

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

TUM School of Engineering and Design

**Eine modulare Methodik zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der
Produktion**

Harald Hermann Ulrich Bauer

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

Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr. Markus Zimmermann

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

2. Prof. Dr.-Ing. Konrad Nübel

Die Dissertation wurde am 29.09.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 30.01.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XIII
Verzeichnis der Formelzeichen	XVII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen	5
1.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs	7
1.4 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen und Spezifizierung des Untersuchungsbereichs	13
2.1 Änderungen und Änderungsursachen in der Produktion	13
2.1.1 Produktions- und Fabriksysteme	14
2.1.2 Änderungen in der Produktion	17
2.1.3 Änderungsursachen in der Produktion	19
2.2 Änderungsmanagement in der Produktion	21
2.3 Änderungsauswirkungen und deren Analyse	24
2.4 Modellierung von Produktionssystemen	25
2.5 Unschärfe und Unsicherheit im Kontext von Änderungen in der Produktion	30
2.6 Process Tailoring und Modularisierung	31

2.7	Herausforderungen bei der Auswirkungsanalyse von zyklischen Änderungen im Kontext der Produktion	34
3	Stand der Wissenschaft und Technik	37
3.1	MCM-Prozesse und in diese integrierte Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen	38
3.2	Alleinstehende Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion	45
3.3	Resultierender Handlungsbedarf und Forschungshypothese	53
4	Forschungsfragen und resultierende Anforderungen	59
4.1	Detaillierung der Forschungsfragen	59
4.2	Anforderungen an die Methodik	61
4.2.1	Allgemeine, formale Anforderungen	61
4.2.2	Spezifische, inhaltliche Anforderungen	62
5	Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion	65
5.1	Identifikation der notwendigen Analysemodule	66
5.2	Aufbau der Analysemodule	73
5.3	Detaillierung der Analysemodule	74
5.3.1	Zielsetzung 1: Durch eine Änderungsursache betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe	75
5.3.2	Zielsetzung 2: Notwendige Änderungsmaßnahmen in der Produktion	80
5.3.3	Zielsetzung 3: Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe durch Änderungsfortpflanzungen	85

5.3.4	Zielsetzung 4: Einfluss der Änderung/en auf Produktionskennzahlen	96
5.3.5	Zielsetzungen 5 und 6: Änderungskosten und Änderungsaufwand sowie Umsetzungsdauer	104
5.3.6	Erhöhung von Ergebnisgenauigkeiten mittels Expertenworkshops	109
6	Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion	113
6.1	Zusammenhang der Module	113
6.2	Aufbau und Ablauf der Methodik	115
6.2.1	Bestimmung der Position im Änderungsmanagement, der Rahmenbedingungen und der Ziele	116
6.2.2	Auswahl der benötigten Zielsetzungen der Analysemodule . . .	116
6.2.3	Auswahl der Analysemodule und des Automatisierungsgrads .	120
6.2.4	Erstellung des fallspezifischen Analysevorgehens und der benötigten Dokumente	121
7	Evaluation der Methodik	123
7.1	Anwendungsevaluation in der Lernfabrik für schlanke Produktion . . .	124
7.1.1	Konfiguration der Auswirkungsanalyse	125
7.1.2	Auswirkungsanalyse der Einführung eines neuen Schraubsystems	133
7.2	Erfolgsevaluation in der industriellen Praxis	137
7.2.1	Konfiguration der Auswirkungsanalyse	138
7.2.2	Durchführung der individuellen Analyse	143
7.3	Bewertung der entwickelten Methodik	146
7.3.1	Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen	146
7.3.2	Bewertung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses	149

7.3.3	Kritische Diskussion der entwickelten Methodik	151
8	Zusammenfassung und Ausblick	155
8.1	Zusammenfassung	155
8.2	Ausblick	156
	Literatur	161
	Anhang	187
A.1	Flussverbindungen in einem Produktionssystem	187
A.2	Analyse von Änderungsauswirkungen im Engineering Change Management	188
A.3	Recherche zu Zielsetzungen der Änderungsauswirkungsanalyse	190
A.4	Betreute Studienarbeiten	195

Abbildungsverzeichnis

1.1	Maßnahmen für die effiziente Handhabung von Änderungen in der Produktion und Fokus dieser Arbeit	3
1.2	Forschungsmethodik und Kapitelstruktur der Arbeit	9
2.1	Die Fabrik als System	16
2.2	Einordnung des MCM in den Fabriklebenszyklus	17
2.3	Merkmale eines MC	19
2.4	Änderungsursachen und Rezeptorenmodell	21
2.5	Stage-Gate-Prozess für das MCM	22
2.6	Modell, Metamodell, Referenzmodell	25
2.7	Merkmale eines Modells	27
2.8	Übersicht verschiedener Modelle von Produktions- und Fabrikssystemen	28
2.9	DSM, DMM und MDM als matrizenbasierte Modellierungsmethoden .	30
2.10	Allgemeines Vorgehen zur Modularisierung	33
2.11	Prozessbaustein	34
3.1	Änderungsmanagementprozess nach Rößing (2007) und Aurich et al. (2004)	40
3.2	Änderungsmanagement nach Malak (2013)	42
3.3	Vorgehensweise zur Adaption von Produktionsstrukturen	47
3.4	Vorgehen zur Analyse von Änderungsauswirkungen	50
3.5	Analyse von Änderungsauswirkungen mittels Domain-Mapping-Matrix	51
3.6	Harvey-Balls-Skala	53
3.7	Übersicht des Stands der Technik zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion	54
4.1	Allgemeine und spezifische Anforderungen an den Lösungsansatz . . .	61

5.1	Kapitelstruktur und -zusammenhänge zur Modularisierung der Analyse von Änderungsauswirkungen	66
5.2	Detaillierungsebenen der Analyse von Änderungsauswirkungen	66
5.3	Beispiele für die Detaillierungsebenen der Analyse von Änderungsauswirkungen und Festlegung der Modulstruktur	67
5.4	Übersicht der Module für die Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion	72
5.5	Aufbau eines Analysemoduls für die Analyse von Änderungsauswirkungen	73
5.6	Analysemodule 1.1, 1.2 und 1.3	75
5.7	Modulspezifische Einträge in die DMM zur Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Rezeptoren und Fabrikelementen	77
5.8	Gesamtstruktur der MDM	77
5.9	Modulspezifisches Analyseverfahren zur Identifikation von Änderungsbedarfen	78
5.10	Excel-Template und -Analysewerkzeug (Ausschnitt)	79
5.11	Analysemodule 2.1 und 2.2	81
5.12	Änderungssteckbrief	85
5.13	Analysemodule 3.1 bis 3.3	86
5.14	Darstellungen von Flussverbindungen bei der Modellierung des Produktionssystems	89
5.15	Darstellungen von Arbeitsstationen bei der Modellierung des Produktionssystems	90
5.16	Darstellungen von Lagersystemen bei der Modellierung des Produktionssystems	91
5.17	Modellierung von übergeordneten organisatorischen und räumlichen Elementen sowie informationstechnischen Systemen mit Swimlanes	92
5.18	Modellierung von Zusatzinformationen und Bedingungen	93
5.19	Modulspezifisches Analyseverfahren zur Identifikation von Änderungsfortpflanzungen	94
5.20	Analysemodule 4.1 bis 4.6	96
5.21	Wertstromkennzahlensystem	97
5.22	Kennzahlen-Rechensystem (a) und Cognitive Map (b) der Gesamtanlageneffektivität einer Arbeitsstation	99

5.23	Modulspezifisches Analyseverfahren zur Bestimmung von Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen	101
5.24	PERT-Beta-Verteilung	102
5.25	Analysemodule 5.1 bis 5.3	104
5.26	Analysemodule 6.1 bis 6.3	105
5.27	Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungen in der Produktion . . .	107
5.28	Auszug aus dem Excel-Tool zur Bewertung von Änderungskosten und -aufwänden	109
5.29	Analysemodul 7	110
6.1	Konfigurationslogik für die Gestaltung der Änderungsauswirkungsanalyse	114
6.2	Vorgehensweise zur Erstellung der fallspezifischen Analyse von Änderungsauswirkungen	115
6.3	Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil 1)	118
6.4	Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil 2)	119
6.5	Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil 3)	120
7.1	Identifikation der relevanten Module bzw. Bereiche – Anwendungsevaluation	127
7.2	Auszug aus der DMM der LSP	129
7.3	Auszug aus der graphenbasierten Modellierung der LSP	131
7.4	Auszug aus dem Kennzahlen-Rechensystem der LSP	132
7.5	Prozess zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der LSP	132
7.6	Änderungssteckbrief zur Einführung neuer Stabschrauber in die Getriebemontage der LSP GmbH	135
7.7	Bewertung der Änderungskosten und Änderungsdauer zur Einführung neuer Stabschrauber in die Getriebemontage der LSP GmbH	136
7.8	Position der Auswirkungsanalyse im Änderungsprozess des Anwendungspartners	138
7.9	Identifikation der relevanten Module bzw. Bereiche – Erfolgsevaluation	141
7.10	Auszug aus der befüllten DMM der Auto AG	143

7.11 Auswirkungen einer Änderung	144
7.12 Feature-Größe – Auswirkungen und Maßnahmen	145
7.13 Bewertung der Erfüllung der an die Lösung gestellten Anforderungen .	146
A.1 Kategorisierung von Konzepten zur Analyse von Änderungsauswirkun- gen im ECM	189
A.2 Anwendungsfälle für die Analyse von Änderungsauswirkungen im ECM und deren Einordnung in den ECM-Prozess	190

Tabellenverzeichnis

2.1	Vorteile der (Prozess-)Modularisierung	33
3.1	Vorteile der (Prozess-)Modularisierung für die Analyse von Änderungs- auswirkungen	57
6.1	Fragen zur Festlegung der Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls .	117
7.1	Festlegung der Rahmenbedingungen in der Anwendungsevaluation . .	126
7.2	Zeitaufwand zur Konfiguration und Vorbereitung der fallspezifischen Auswirkungsanalyse in der LSP	133
7.3	Festlegung der Rahmenbedingungen in der Erfolgsevaluation	140
7.4	Zeitaufwand zur Konfiguration und Vorbereitung der fallspezifischen Auswirkungsanalyse in der Auto AG	144
A.1	Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Pro- duktion	190
A.2	Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Pro- duktion	191
A.3	Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Pro- duktion	192
A.4	Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Pro- duktion	193
A.5	Übersicht Ergebnisse der industriellen Fallstudien zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion	193

A.6	Übersicht Ergebnisse der industriellen Fallstudien zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion	194
A.7	Übersicht Ergebnisse der Experteninterviews zu erfassten Änderungskosten und Bewertungsgrößen für Änderungen	194
A.8	Übersicht Ergebnisse der Experteninterviews zu erfassten Änderungskosten und Bewertungsgrößen für Änderungen	195
A.9	Studienarbeiten, die zur vorliegenden Arbeit beigetragen haben	196

Abkürzungsverzeichnis

CRP	Change Responsibility Profile
DMM	Domain-Mapping-Matrix
DRM	Design Research Methodology
DSM	Design-Structure-Matrix
ECM	Engineering Change Management
FF	Forschungsfrage
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
GF	graphenbasierte Fabrikmodellierung
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
LSP	Lernfabrik für schlanke Produktion
MC	Manufacturing Change
MCM	Manufacturing Change Management
MDM	Multiple-Domain-Matrix
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PPR	Produkt-Prozess-Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
SLM	Selektives Laserschmelzen
SysML	System Modeling Language
TUM	Technische Universität München
UML	Unified Modeling Language

Verzeichnis der Formelzeichen

a	Optimistischstes Szenario innerhalb des PERT-Verfahrens
b	Pessimistischstes Szenario innerhalb des PERT-Verfahrens
c	Wahrscheinlichstes Szenario innerhalb des PERT-Verfahrens
α	Formparameter der Beta-Verteilung
β	Formparameter der Beta-Verteilung

1 Einleitung

Heraclitus 535-475 BC: Nothing endures but change.

1.1 Ausgangssituation

Das heutige Umfeld produzierender Unternehmen ist geprägt durch zyklisch wiederkehrende Ereignisse, welche auf unterschiedlichen Wegen die bestehenden Produktionssysteme beeinflussen (SCHÖNMANN 2019, S. 1; CISEK ET AL. 2002, S. 442). Aus Sicht der Produktion werden sowohl Zyklen innerhalb des Fabrikums als auch Zyklen aus dem Fabrikumfeld als maßgebliche Einflussfaktoren betrachtet (DÉR ET AL. 2023). Aus dem Fabrikumfeld wirken vor allem der Produkttechnologie- und der Prozesstechnologielebenszyklus auf das Fabrikumsystem ein, während intern unter anderem der Produkt- und der Betriebsmittellebenszyklus, der Produktionsänderungszyklus und der Produktionsstrukturzyklus zu berücksichtigen sind (DÉR ET AL. 2023; PLEHN ET AL. 2015a, S. 151).

Während jeder der genannten Zyklen andere Elemente der Produktion betrifft, stellen alle ein temporal und strukturell wiederkehrendes, in definierte Phasen gliederbares Verlaufsmuster dar, welches anhand seiner Wiederholung, Dauer, Auslöser und Auswirkungen beschrieben werden kann (VOGEL-HEUSER ET AL. 2014, S. 6). Die Kenntnis über die Eigenschaften der Zyklen stellt eine essentielle Grundlage für die Planung von Produktionssystemen dar (REINHART ET AL. 2009b, S. 750; DÉR ET AL. 2022), da die mit den Zyklen verbundenen Ereignisse nicht in jedem Fall durch die Flexibilität des Produktionssystems abgedeckt werden können (KARL 2015, S. 9; ZÄH ET AL. 2005b, S. 4). Befindet sich eine Anforderung an das Produktionssystem durch die Veränderung eines Einflussfaktors außerhalb des Flexibilitätskorridors der Produktion, muss eine Änderung am System frühzeitig eingeplant und effizient umgesetzt werden.

Es ist festzustellen, dass in den letzten Jahren eine Dynamisierung der Zyklen im Umfeld der Produktion erfolgt, was sich insbesondere an den Produktlebenszyklen bemerkbar macht (ABELE & REINHART 2011, S. 15; H. A. ELMARAGHY 2009; WIENDAHL ET AL. 2007). Produzierende Unternehmen stehen somit vor der Herausforderung, eine dynamische und kontinuierliche Produktionsplanung und damit einhergehende Planung von Änderungen zu ermöglichen (ZÄH ET AL. 2005a), um in einem sich durchgängig verändernden Umfeld – in diesem Sinne häufig auch als turbulent bezeichnet – wettbewerbsfähig zu bleiben (NYHUIS 2008, S. 13; SCHUH 1999, S. 47).

Dies ist nur möglich, wenn die Umsetzung von Änderungen effizient und in kürzester Zeit abgewickelt wird (PLEHN 2017; STANEV ET AL. 2008) und somit „schnell und flexibel auf technologische Trends und Veränderungen im Markt“ (MILBERG & SCHUH 2002, S. 11) reagiert werden kann. Aufgrund der gleichzeitig steigenden Komplexität von Produkten und Produktionssystemen (KOCH 2017, S. 1) stellt die Handhabung von Änderungen jedoch selbst eine noch nicht ausreichend gelöste Problemstellung dar. So ist in der Industrie erkennbar, dass Unternehmen den Bedarf für ein erfolgreiches Änderungsmanagement erkennen. In der Studie von KOCH & HOFER (2016) zeigte sich, dass im Jahr 2016 93 % der 85 befragten Personen Änderungsmanagement in der Produktion für die Zukunft als bedeutend oder sehr bedeutend ansahen. Knapp 40 % führten jährlich mehr als 500 Änderungen durch. Strukturierte Prozesse und Methoden für die Handhabung von Änderungen in der Produktion lagen jedoch nur selten vor. Durch eine weiterführende Umfrage im Jahr 2021 wurde die zukünftige Bedeutung des Änderungsmanagements erneut bestätigt (SIPPL ET AL. 2021): 80 % der 34 Teilnehmenden ordnen dem Änderungsmanagement in den kommenden Jahren eine sehr bedeutende oder bedeutende Rolle zu.

In der Wissenschaft werden zum Umgang mit der hohen Frequenz von Änderungen aufgrund der zahlreichen Zyklen im Kontext der Produktion mehrere Maßnahmen beschrieben. Diese ergänzen sich zu einer ganzheitlichen Betrachtung der unterschiedlichen Herausforderungen des Änderungsmanagements (siehe Abbildung 1.1).

Die **Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme (1)** hat zum Ziel, die Aufwände für Änderungen durch die Berücksichtigung sogenannter Wandlungsbefähiger wie z. B. die Mobilität oder die Erweiterbarkeit von Fabrikobjekten zu minimieren. „Wandlungsfähigkeit“ kennzeichnet das Potenzial einer Fabrik, durch system- und strukturimmanente Wandlungsbefähiger, reaktiv oder proaktiv eine zielgerichtete Neu- oder

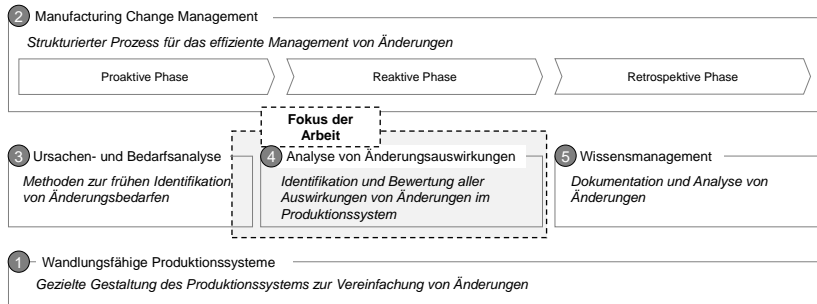


Abbildung 1.1: Maßnahmen für die effiziente Handhabung von Änderungen in der Produktion und Fokus dieser Arbeit

Rekonfiguration der Wandlungsobjekte auf allen Systemebenen bei geringem Aufwand durchführen zu können, um die interne und externe Effizienz der Fabrik zu erhöhen oder zu erhalten.“ (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 52). Die Wandlungsfähigkeit einzelner Fabrikobjekte lässt sich an der Ausprägung der Wandlungsbefähiger bewerten (HEGER 2007) und sollte gezielt geplant werden, um die Unsicherheiten und die Unschärfe bezüglich zukünftiger Entwicklungen zu adressieren (HAWER 2020). Die dadurch schnell umsetzbaren Rekonfigurationen gilt es zudem durch eine passende Produktionsplanung und -steuerung zu ermöglichen (COLLEDANI & ANGIUS 2019; ISMAIL & H. ELMARAGHY 2009).

Zur Umsetzung konkreter Anpassungen dient das **Änderungsmanagement**, welches im Rahmen der Produktion als **Manufacturing Change Management (MCM)** (2) – analog zum sog. Engineering Change Management (ECM) zur Handhabung von Produktänderungen – bezeichnet wird (KOCH 2017, S. III). Die Aktivitäten und Verantwortlichkeiten im MCM werden im Rahmen der MCM-Prozesse definiert und strukturiert. Das Ziel des MCM ist die „effiziente Planung, Auswahl, Bearbeitung und Überwachung von Änderungen in der Produktion“ (KOCH 2017, S. 26). Generell lassen sich MCM-Prozesse in eine proaktive, eine reaktive und eine retrospektive Hauptphase gliedern (KOCH ET AL. 2016a).

Weitere Maßnahmen zum effizienten Management von Änderungen in der Produktion lassen sich den einzelnen Phasen des MCM zuordnen. So versuchen Methoden zur **Ursachen- und Bedarfsanalyse (3)** die Umwelteinflüsse von Produktionssystemen proaktiv zu analysieren und eine frühzeitige Erkennung von notwendigen Anpassungen

zu gewährleisten. Dabei werden beispielsweise die Entwicklungen von produktionsrelevanten Kennzahlen zur prospektiven Identifikation von Effizienzverlusten überwacht (POHL 2014, S. 62) oder die Verlaufskurven zyklischer Einflüsse modelliert (DÉR ET AL. 2022; ECHSLER MINGUILLON ET AL. 2019; PLEHN ET AL. 2015a).

Besteht ein Änderungsbedarf, ist es essentiell, die Änderungsursache sowie die Änderungsauswirkungen zum Abschluss der proaktiven bzw. zu Beginn der reaktiven Phase des MCM detailliert zu analysieren, um eine effiziente und ganzheitliche Umsetzung der Änderung zu ermöglichen (KOCH 2017; RÖSSING 2007). Hierfür stellen Ansätze zur **Analyse von Änderungsauswirkungen (4)** Methoden für die Identifikation und Bewertung von Auswirkungen auf unterschiedliche Kriterien wie Änderungskosten, -fortpflanzung oder -dauer zur Verfügung (AURICH & MALAK 2010; MALAK & AURICH 2013; PLEHN 2017). Die Grundlage der Analyse ist dabei in der Regel eine detaillierte Modellierung des Produktionssystems, um die Zusammenhänge zwischen den Fabrikelementen verstehen und evaluieren zu können. Zum Start der Auswirkungsanalyse liegen in der Regel ein konkreter Änderungsbedarf oder Änderungsvorschläge in der Produktion vor.

Abschließend werden Methoden aus dem **Wissensmanagement (5)** wie Lessons Learned der retrospektiven Phase des MCM zugeordnet. Das Ziel ist die Erleichterung weiterer Änderungen durch die geeignete Dokumentation von Erfahrungen aus abgeschlossenen Veränderungsprojekten. Die Nachbereitung von Änderungen stellt ebenso die Basis für datenbasierte Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen dar, wie sie beispielsweise in der Produktentwicklung bereits seit einigen Jahren genutzt werden (LEE & HONG 2017; M. C. WICKEL & LINDEMANN 2015).

Zusammenfassend liefern alle fünf Maßnahmen einen wichtigen Beitrag zur Umsetzung von Änderungen in der Produktion. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Analyse von Änderungsauswirkungen. Diese stellt ab der späten proaktiven Phase die Entscheidungsgrundlage für die weiteren Prozessschritte des MCM dar und hat somit einen maßgeblichen Einfluss auf die reaktive Planung und Implementierung von Änderungen. Die Auswirkungsanalyse kann zu diesem Zweck zu unterschiedlichen Zeitpunkten des MCM in verschiedener Ausprägung zum Einsatz kommen. So spielt zu Beginn der proaktiven Phase beispielsweise zunächst die Identifikation von Stakeholdern eine entscheidende Rolle, während nach der Bestimmung von möglichen Änderungskonzepten unter anderem eine Kostenanalyse durchgeführt werden muss

(KOCH 2017, S. 209–218). Je nach Phase bzw. Schritt im MCM aber auch je nach Kontext der Anwendungen – z. B. je nach Änderungsursache – müssen unterschiedliche Informationsbedarfe bedient werden (BAUER ET AL. 2018). Zudem kann in industriellen Anwendungsfällen festgestellt werden, dass neben den Informationsbedarfen auch die Rahmenbedingungen für die Durchführung der Analyse zwischen den möglichen Anwendungsfällen z. B. hinsichtlich der verfügbaren Eingangsinformationen oder der Komplexität des Produktionssystems verschieden sein können.

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen

Wissenschaftliche Ansätze bieten vereinzelte Analysemethoden für spezifische Anwendungsfälle der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion, sind jedoch für eine breite Anwendung aufgrund der notwendigen Flexibilität nicht ausreichend (BAUER ET AL. 2020). Des Weiteren sind bestehende Analysen nur begrenzt auf den zyklischen Charakter von Änderungsbedarfen ausgerichtet und mit teilweise stark änderungsspezifischen Modellierungsaufwänden verbunden. Die Modularisierung von Prozessen im Allgemeinen bietet indessen Potenziale und Vorteile hinsichtlich Wiederverwendbarkeit, flexibler Konfiguration und situativer Erweiterung (HAGEN 2003, S. 81). Dabei werden Gesamtprozesse in einzelne Prozessbausteine bzw. -module unterteilt, welche jeweils mit einem klar definierten Eingangs- und Ausgangszustand verbunden sind (GRUNWALD 2002, S. 72, 75). Mittels einheitlicher Schnittstellen wird eine einfache Austauschbarkeit und Integrierbarkeit der Module gewährleistet (KIRCHHOF 2003, S. 211).

Vor diesem Hintergrund ist das wesentliche Ziel der vorliegenden Arbeit, produzierende Unternehmen zu befähigen, die Auswirkungen von zyklischen Änderungen in der Produktion effizient zu analysieren, um die Wettbewerbsfähigkeit durch eine beschleunigte Umsetzung von Änderungen sicherzustellen. Hierfür ist eine Ausrichtung der Analyse an unternehmens- und kontextspezifischen Informationsbedarfen und Rahmenbedingungen notwendig. Dies soll in dieser Arbeit durch eine Modularisierung des Analysevorgehens sowie eine hierauf basierende fallspezifische Gestaltung der Auswirkungsanalyse erreicht werden.

Um den ganzheitlichen Einsatz des Lösungsansatzes von der proaktiven Phase bis zur reaktiven Umsetzungsplanung im MCM zu ermöglichen, wird im Rahmen der Arbeit

auch die Identifikation von Änderungsbedarfen in der Produktion aufgrund von Veränderungen im Fabrikumfeld als Bestandteil der Analyse von Änderungsauswirkungen angesehen und nicht nur eine Analyse ab einem bekannten Änderungsvorschlag bzw. einer Produktionsänderung betrachtet (siehe Abbildung 1.1 und Abschnitt 2.3)¹. Die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit lässt sich somit wie folgt zusammenfassen:

Ermöglichung einer effizienten und bedarfsorientierten Analyse – Identifikation und Bewertung – von Änderungsauswirkungen in der Produktion mittels einer Modularisierung des Analysevorgehens zur fallspezifischen Gestaltung der Auswirkungsanalyse

Für die Erreichung der Zielsetzung der Arbeit lassen sich drei Forschungsfragen (FF) ableiten:

- FF#1 In welche Module kann die Auswirkungsanalyse unterteilt werden, um die fallspezifischen Informationsbedarfe ihrer möglichen Anwendungsfälle erfüllen zu können?
- FF#2 Welche Modellierungs- und Analysemethoden sind für die einzelnen Module in der Produktion geeignet?
- FF#3 Nach welchem Prozess kann eine fallspezifische Vorgehensweise für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion erstellt werden?

Im Hinblick auf den Modellierungsaufwand für eine Auswirkungsanalyse bei zyklischen Einflussfaktoren ist insbesondere die Wiederverwendbarkeit der vom Anwendenden zu erstellenden Modelle und deren Erweiterbarkeit auf Basis von steigender Erfahrung essentiell. Gleichzeitig gilt es, den Detaillierungsgrad an der individuellen Zielsetzung auszurichten, um eine ausreichende Aussagekraft bei geringem Aufwand zu erreichen (K. FELDMANN & REINHART 2000, S. 22). Dementsprechend sollen Modellierungsmethoden gewählt und entwickelt werden, die sowohl einen flexiblen Detaillierungsgrad als auch eine Wiederverwendung und Erweiterbarkeit ermöglichen. Des Weiteren muss mit den gewählten Analyse- und Modellierungsmethoden die Betrachtung von Planungsunsicherheiten in den Eingangsinformationen integrierbar sein, um einen Einsatz zu einem frühen Zeitpunkt des MCM abzudecken.

¹ Als Startpunkt der Methodik werden die sogenannten Rezeptoren einer Fabrik genutzt, welche die Möglichkeit bieten, externe (und interne) Einflussfaktoren für die Analyse ihrer Auswirkung auf die Produktion zu bündeln. Die genauere Erläuterung des Rezeptorenmodells und des Umfangs der Methodik dieser Arbeit erfolgen in Kapitel 2.

Die zur Erreichung der beschriebenen Ziele zu entwickelnden Modelle und Methoden sind so zu gestalten, dass sie in der industriellen Praxis wirtschaftlich angewendet werden können. Dementsprechend gilt es, ein möglichst geringen Aufwand für den Anwendenden zu erzeugen, was beispielsweise durch Vorlagen, Leitfragen sowie softwaretechnische Unterstützung erreicht werden kann.

1.3 Eingrenzung des Untersuchungsbereichs

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Analyse von **zyklischen Änderungen**, also Änderungen, die nach einem wiederkehrenden Muster angeregt werden. Der Aufwand für die initiale Erstellung der betrachteten Modelle übersteigt somit ggf. bei einer einmaligen Auswirkungsanalyse den Nutzen der Analyse. Einmalige Änderungen wie beispielsweise größere organisatorische Transformationen, welche in dieser Form nur selten oder einmalig auftreten, sind dementsprechend nicht im Fokus der Arbeit.

Des Weiteren ist die Grundlage für eine Wiederverwendung von Modellen im Rahmen von regelmäßigen Auswirkungsanalysen, dass das zu analysierende Produktionssystem bei aufeinanderfolgenden Durchführungen grundsätzlich gleich bzw. ähnlich bleibt. Es stehen somit Produktionssysteme im Fokus, welche über einen größeren Zeitraum ein vergleichbares Produktspektrum fertigen. Dies ist insbesondere in der **Serien- und Massenproduktion** der Fall.

Eine strukturierte Analyse von Änderungsauswirkungen ist zudem ein Mittel zur Unterstützung von abteilungsübergreifender Kommunikation und zur Beherrschung von Komplexität. Dementsprechend liegt der größte Mehrwert in der Anwendung bei Unternehmen mit einer hohen Produkt-, Produktions- und Organisationskomplexität. In kleinen Unternehmen, in denen nur wenige Expert*innen sich direkt miteinander abstimmen können und die Systemkomplexität von einzelnen Expert*innen ganzheitlich erfasst werden kann, muss die Aufwand-Nutzen-Betrachtung der Anwendung des vorliegenden Lösungsansatzes zunächst genauer betrachtet werden.

Hinsichtlich der hierarchischen Betrachtung der Produktion bezieht sich die zu entwickelnde Auswirkungsanalyse in Anlehnung an WIENDAHL ET AL. (2005) auf die Ebene der Fabrik und die darin beinhalteten Bereiche, Gruppen, Arbeitsplätze und Prozesse. Standorteigenschaften außerhalb des Fabrikgebäudes sowie Produktionsnetzwerke werden nicht betrachtet.

Grundsätzlich sind jedoch alle Unternehmen und Branchen, die sich mit der Entwicklung und Produktion von physischen Produkten befassen, Teil des Untersuchungsbereichs. Der Schwerpunkt liegt auf Fabriken mit einer mittleren bis hohen Produkt-, Produktions- und Organisationskomplexität und einer Serien- oder Massenproduktion. Die Einschränkungen stellen jedoch keine klaren Abgrenzungen dar, sondern verändern primär die Aufwand-Nutzen-Betrachtung des entwickelten Lösungsansatzes.

Hinsichtlich des Umfangs der Auswirkungsanalyse wird, wie in Kapitel 1.2 angesprochen, die Identifikation von Änderungsbedarfen durch die direkte Verknüpfung von externen Einflussfaktoren mit der Produktion als Startpunkt und Bestandteil der Methodik berücksichtigt.

1.4 Forschungsmethodik und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit baut auf der Forschungsmethode der Design Research Methodology (DRM) nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) auf. Die DRM ist im Bereich Engineering und Design eine der umfangreichsten und am detailliertesten beschriebenen Forschungsmethoden. Sie vereint Ansätze aus dem Operations Management, dem Systems Thinking und Systems Engineering sowie der Soft Systems Methodology (KOCH 2017, S. 9) und ist für die Entwicklung einer Unterstützungsmethodik für die Analyse von Änderungsauswirkungen im komplexen System der Produktion geeignet.

Die DRM folgt einem vierstufigen, iterativen Forschungsansatz und beinhaltet eine Klärung der Forschungsziele, eine Deskriptive Studie I, eine Präskriptive Studie und eine Deskriptive Studie II (siehe Abbildung 1.2)(BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 15). In Abhängigkeit von der Art des Forschungsvorhabens werden die jeweiligen Stufen unterschiedlich detailliert durchgeführt². Nach dem DRM-Framework kann das vorliegende Forschungsvorhaben als Typ 3 – Entwicklung einer Lösung – klassifiziert werden. Dabei werden die Klärung der Forschungsziele sowie die Deskriptive Studie I

² BLESSING & CHAKRABARTI (2009, S. 18) unterscheiden in der DRM eine literaturbasierte, eine umfassende und eine initiale Durchführung der Phasen der DRM. Eine umfassende Studie beinhaltet zusätzlich zur Literaturanalyse Ergebnisse, die von der*dem Forscher*in beispielsweise in Form einer empirischen Studie oder der Entwicklung einer Unterstützung erzeugt werden. Eine initiale Studie steht am Abschluss eines Projekts und bereitet die Ergebnisse durch die Durchführung der ersten Schritte einer Phase für die Nutzung/Anwendung durch andere vor. Zudem werden in einer initialen Studie die Konsequenzen der Forschungsergebnisse aufgezeigt.

literaturbasiert, die Präskriptive Studie umfassend und die Deskriptive Studie II initial durchgeführt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 18).

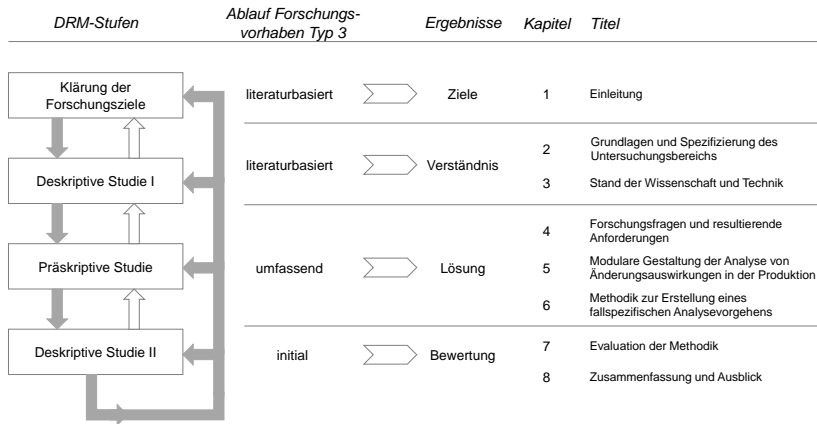


Abbildung 1.2: Forschungsmethodik in Anlehnung an BLESSING & CHAKRABARTI (2009) und Kapitelstruktur der Arbeit

Im Folgenden werden die Inhalte und die Zielsetzungen der einzelnen Stufen erläutert und deren Umsetzung in der vorliegenden Arbeit beschrieben.

Zur **Klärung der Forschungsziele** werden mittels einer Literaturrecherche erste Beweise für die eigenen Forschungsannahmen identifiziert und ein realistisches Forschungsziel definiert. Basierend auf den Ergebnissen der Literaturrecherche werden anschließend sowohl der IST-Zustand als auch der SOLL-Zustand am Ende des Forschungsvorhabens definiert und Bewertungskriterien für die Ergebnisse festgelegt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 15).

In der vorliegenden Arbeit wurden sowohl die Ausgangssituation als auch die übergeordnete Zielsetzung und die forschungsleitenden Fragestellungen in Kapitel 1 beschrieben. Zudem wurden die wichtigsten Kriterien, welche die Arbeitsergebnisse erfüllen sollen, dargelegt. Eine erste Eingrenzung des Vorhabens zur klaren Einordnung in den IST-Zustand ist in Abschnitt 1.3 zu finden.

In der anschließenden **Deskriptiven Studie I** wird ein vertieftes Verständnis des Forschungsumfelds erarbeitet. Dabei werden die Beschreibung des IST-Zustandes sowie die

Bewertungskriterien für die Ergebnisse weiter detailliert (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 15 f.).

Zu diesem Zweck werden in Kapitel 2 zunächst die notwendigen Grundlagen für das Verständnis der Arbeit erläutert. In diesem Zuge werden die relevanten Begriffe des Forschungsfeldes eindeutig definiert. Die Analyse von Änderungsauswirkungen wird detailliert in den Kontext des MCM eingeordnet und es erfolgt eine klare Definition der Produktion. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten zur Modellierung von Produktionssystemen und von Unsicherheiten vorgestellt. Mit der Beschreibung der Prozessmodularisierung zeigt Abschnitt 2.6 das essentielle Fundament für die Entwicklung des Lösungsansatzes. Anschließend werden in Abschnitt 2.7 die Herausforderungen bei der Analyse von Änderungsauswirkungen, welche zur Bewertung bisheriger Lösungen genutzt werden, weiter detailliert.

In Kapitel 3 wird der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik bezüglich der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion betrachtet und bestehende Ansätze werden anhand der Herausforderungen bewertet. Zum Abschluss der Deskriptiven Studie I wird der Handlungsbedarf abgeleitet (siehe Abschnitt 3.3).

Im Zuge der **Präskriptiven Studie** erfolgt die Erarbeitung einer Lösung für das formulierte Forschungsziel. Darüber hinaus wird der SOLL-Zustand weiter detailliert (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 16). Der Lösungsansatz der vorliegenden Arbeit soll produzierende Unternehmen zur effizienten und bedarfsorientierten Auswirkungsanalyse von zyklischen Änderungen in der Produktion befähigen. Hierfür werden in Kapitel 4 zunächst die Forschungsfragen und die resultierenden Anforderungen auf Grundlage des Forschungsbedarfs aus Kapitel 3 weiter detailliert, um in Kombination mit den Erkenntnissen zur Prozessmodularisierung aus Kapitel 2 den SOLL-Zustand genauer zu definieren. Anschließend wird in Kapitel 5 die Modularisierung der Analyse entwickelt. Basierend hierauf erläutert Kapitel 6 die Methodik zur Gestaltung eines fallspezifischen Analysevorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion und schließt die Präskriptive Studie ab.

Abschließend wird die erarbeitete Lösung in der **Deskriptiven Studie II** anhand der festgelegten Bewertungskriterien evaluiert, um festzustellen, inwieweit die Ergebnisse den SOLL-Zustand erfüllen (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 16 f.). Hierfür werden in Kapitel 7 sowohl eine Anwendungs- als auch eine Erfolgsevaluation durchgeführt.

Auf Basis der Anwendungen wird die Erfüllung der Forschungsfragen und der Anforderungen aus Kapitel 4 bewertet und es werden weitere mögliche Forschungsschwerpunkte (siehe Kapitel 8) abgeleitet.

2 Grundlagen und Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Im Folgenden sollen einerseits die notwendigen Grundlagen für das Verständnis der vorliegenden Arbeit beschrieben werden. Andererseits wird die Thematik der Auswirkungsanalyse von Änderungen in der Produktion in den Gesamtkontext des MCM eingebunden.

Hierfür werden in Abschnitt 2.1 zunächst der Änderungsbegriff im Kontext der Produktion sowie die möglichen Änderungsursachen erläutert. Abschnitt 2.2 beschreibt das MCM zu Handhabung von Änderungen in der Produktion. Anschließend werden die möglichen Änderungsauswirkungen sowie deren Analyse detailliert betrachtet und die Auswirkungsanalyse von Änderungen in das MCM eingeordnet (siehe Abschnitt 2.3). Zwei grundlegende Aspekte der Auswirkungsanalyse – die Modellierung von Fabrikssystemen und der Umgang mit Unsicherheiten und Unschärfe – werden in Abschnitt 2.4 und Abschnitt 2.5 eingeführt. Abschnitt 2.6 betrachtet die Grundlagen des Process Tailoring und der Modularisierung als Gestaltungsrahmen der zu entwickelnden Methodik. Abschließend werden in Abschnitt 2.7 die Herausforderungen bei der Analyse von Änderungsauswirkungen im MCM zusammengefasst.

2.1 Änderungen und Änderungsursachen in der Produktion

Zur Einordnung des Betrachtungsbereichs werden im Folgenden zunächst die Produktion bzw. die Fabrik als System mit ihren Elementen und Relationen beschrieben (siehe Abschnitt 2.1.1). Im Anschluss wird auf Änderungen und Änderungsursachen eingegangen (siehe Abschnitt 2.1.2 und Abschnitt 2.1.3).

2.1.1 Produktions- und Fabrikssysteme

Die Produktion umfasst den **Transformationsprozess** von jeglicher Art von Produktionsfaktoren – materiell oder immateriell – zu jeglicher Art von höherwertigem **Produkt** (SCHUH 2014, S. 2). Dieser Wertschöpfungsprozess beinhaltet sämtliche Tätigkeiten, die unmittelbar an der Herstellung von Produkten beteiligt sind (z. B. fertigen, montieren, prüfen und steuern) sowie anfallende Hilfsprozesse. Die genutzten Produktionsfaktoren bzw. **Ressourcen** sind ein definierter Einsatz von menschlicher Arbeitsleistung, Material, Betriebsmitteln, Information und Energie (SCHENK ET AL. 2014, 119 f.). Gleichzeitig werden neben den gewünschten Produkten auch unerwünschte Produkte (z. B. Emissionen oder Abfälle) erzeugt. Die Kernbereiche der Produktion stellen somit **das Produkt, der Prozess und die Ressourcen** dar, wobei alle drei eng miteinander verknüpft sind (AHMAD ET AL. 2018; TOLIO ET AL. 2010).

Den Ort des beschriebenen Transformationsprozesses stellt die Fabrik dar (siehe Abbildung 2.1). Sie wird als ein Ort innovativer, kreativer und ressourceneffizienter Wertschöpfung von industriellen Gütern mittels Produktion und Dienstleistung bezeichnet (WIRTH ET AL. 2012).

Zur detaillierten Beschreibung und Modellierung der Fabrik wird diese in der Regel als System betrachtet. Ein System stellt eine organisierte Menge an Elementen dar (BLISS 2000, S. 81). Nach der allgemeinen Systemtheorie der Technik wird ein System durch verschiedene Merkmale definiert (ROPOHL 2009, S. 77; BLISS 2000, 81 f.): die Verbindung der Elemente und die Wechselwirkung zwischen den Elementen des Systems, die Zusammensetzung des Systems aus Teil-/Subsystemen, die Bildung einer geschlossenen Einheit, der Dienst einer bestimmten Funktion oder eines bestimmten Zwecks und die Abgrenzung des Systems von seiner Umgebung.

Diese Merkmale lassen sich in drei konzeptionellen Aspekten von Systemen darstellen. Das hierarchische Konzept betont die Tatsache, dass jeder Teil eines Systems ein Subsystem darstellt, während jedes System selbst Teil eines übergeordneten Systems ist (ROPOHL 2009, S. 77). Innerhalb des funktionalen Konzepts kann ein System als eine Black Box beschrieben werden, die bestimmte Eingaben (Input) in Ausgaben (Output) umwandelt (ROPOHL 2009, S. 75). Das strukturelle Konzept befasst sich mit dem Verständnis eines Systems als miteinander verbundene Elemente, wobei der Schwerpunkt auf den Wechselbeziehungen dieser Elemente liegt (ROPOHL 2009, S. 75).

Das allgemeine Verhalten von Systemen wird dabei primär durch die Systemstruktur bestimmt (BLISS 2000, S. 83).

Hinsichtlich der **hierarchischen Sicht** kann die Fabrik in bis zu sieben Fabrikebenen unterteilt werden (siehe Abbildung 2.1)(H. A. ELMARAGHY 2009, S. 11; WIENDAHL ET AL. 2007). Die **funktionale Sicht** beschreibt die Fabrik mit Hilfe des Transformationsmodells als Black Box (SCHMIGALLA 1995, S. 82; SCHADY 2008, S. 13). Der Ablauf des funktionalen Transformationsprozesses wird in der **strukturellen Sicht** durch die Fabrik als Flusssystem repräsentiert, wodurch die Relationen zwischen den einzelnen Transformationselementen sowie auch die Inputs und Outputs genauer beschrieben werden. Die Elemente einer Fabrik¹, häufig auch als Fabrikobjekte bezeichnet², umfassen Betriebsmittel, Raum- und Gebäudetechnik, Organisation, Mensch und Führung (HEGER 2007; WIENDAHL ET AL. 2005). Die einzelnen Fabrikelemente sind durch die folgenden Flussarten miteinander verknüpft (WIENDAHL ET AL. 2005, 24 f.): Materialfluss, Energiefluss, Medien- bzw. Stofffluss, Informationsfluss, Kommunikationsfluss, Personalfluss, Wertefluss und Kraftfluss.

Zusammenfassend enthält ein Fabrikssystem alle für die Funktion des Transformationsprozesses der Produktion erforderlichen Verfahren und Einrichtungen. Die hierarchische Struktur lässt sich in die Ebenen Netzwerk, Standort, Generalstruktur, Bereich, Gruppe, Einzelplatz und Prozesse unterteilen (WIENDAHL ET AL. 2007). Die Struktur der Fabrik umfasst die räumliche Anordnung, die Beziehungen und die Eigenschaften von Technologie, Personal und Infrastruktur in einem differenzierbaren Teilbereich eines Produktionsstandorts (PLEHN ET AL. 2015b; PLEHN ET AL. 2016).

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich aus hierarchischer Sicht auf die Ebenen 0 bis IV, also alle Ebenen einer Fabrik. Die Begriffe Fabrik und Produktion werden aus diesem Grund im Folgenden synonym genutzt. Die Produktion wird als Flusssystem betrachtet, wobei die einzelnen Elemente als Black Box interpretiert werden und keine inneren Zusammenhänge z. B. zwischen den einzelnen Bauelementen einer Maschine analysiert werden.

¹ „Unter einem Fabrikelement wird eine fabrikplanerisch gestaltbare physische oder nicht-physische Einheit einer Fabrik verstanden, die so weit detailliert ist, dass sie eindeutig einem der [...] Gestaltungsbereiche einer Fabrik [...] zugeordnet werden kann. Zum Zweck der konkreten Ausplanung kann ein Fabrikelement in weitere Teilelemente zerlegt werden, allerdings nur so weit, wie es aus Sicht der Fabrikplanung zweckmäßig ist.“ (WIENDAHL ET AL. 2005, 18 f.)

² Im Rahmen dieser Arbeit wird der Begriff Fabrikelement genutzt.

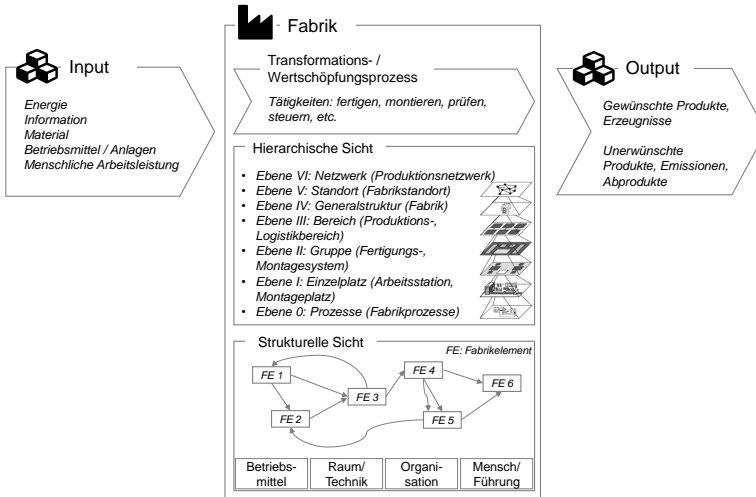


Abbildung 2.1: Die Fabrik als System in Anlehnung an H. A. ELMARAGHY (2009), HEGER (2007), ROPOHL (2009), SCHENK ET AL. (2014) & WIENDAHL ET AL. (2007)

Somit ergibt sich für die Analyse von Änderungen die Anforderung an die Durchführenden, die Abhängigkeiten von technischen, organisatorischen und personellen Fabrikelementen bewerten zu können, wofür ein fundiertes Verständnis bzw. eine tiefe Kenntnis sowohl von Produktionsorganisation als auch Produktionstechnik benötigt wird. Während auf den Fabrikebenen Generalstruktur (Ebene IV) und Bereich (Ebene III) mehr organisatorische und informationstechnische Aspekte zu betrachten sind, spielen vor allem auf den Fabrikebenen Gruppe (Ebenen II) bis Prozess (Ebene 0) prozess- und verfahrensspezifische Wirkzusammenhänge zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen eine tragende Rolle. In der Produktion sind dabei unterschiedliche Fabrikelemente zur Umsetzung der Fertigungsverfahren Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Änderung von Stoffeigenschaften zu analysieren (DIN 8580 2022, S. 7)³. Eine einfache geometrische Bauteiländerung bedingt in der additiven

³ Die DIN 8580 (2022) unterteilt die Fertigungsverfahren in die genannten sechs Hauptgruppen, wobei jede dieser Hauptgruppen wiederum eine Vielzahl an Gruppen und Untergruppen umfasst. Zudem werden neue Fertigungsverfahren bei Bedarf ergänzt, wie beispielsweise das Urformen durch additive Fertigung im Jahr 2022.

Fertigung durch Selektives Laserschmelzen (SLM) beispielsweise unter anderem die erneute maschinenspezifische Analyse der Bauteilanordnung im Bauraum, der somit möglichen Losgröße, der Prozesszeit, der davon abhängigen Maschinenauslastung und der notwendigen Pulvermenge. Darüber hinaus müssen die Auswirkungen auf die gesamte Prozesskette, welche Schritte der Wärmebehandlung, Oberflächenbearbeitung, Reinigung und Montage beinhaltet, überprüft werden (siehe Abschnitt 7.2).

2.1.2 Änderungen in der Produktion

Im Allgemeinen ist eine Änderung „die vereinbarte Festlegung eines neuen Zustands anstelle des bisherigen Zustands und die zugehörige Transformation [an einer freigegebenen Konfiguration]“ (LINDEMANN & REICHWALD 1998, S. 325). Eine Produktionsänderung – im Weiteren auch als Manufacturing Change (MC) bezeichnet – kann demnach als eine Veränderung des Zustands von Fabrikssystemen oder von Fabrikelementen, die bereits in Nutzung sind oder deren Planung freigegeben ist, beschrieben werden (KOCH 2017, S. 23), wodurch sich MCs und das MCM zeitlich in die Phase des Fabrikbetriebs einordnen lassen (siehe Abbildung 2.2)(SCHADY 2008, S. 15). Änderungen können dabei von unterschiedlicher Größe oder Art sein, unterschiedlich viele Personen involvieren sowie von unterschiedlicher Dauer sein (KOCH ET AL. 2016a, S. 11). Eine Änderung ist notwendig, wenn die Anforderungen an das Produktionssystem durch eine Veränderung der Umwelt außerhalb des Flexibilitätskorridors der Produktion liegen (AZAB ET AL. 2013).

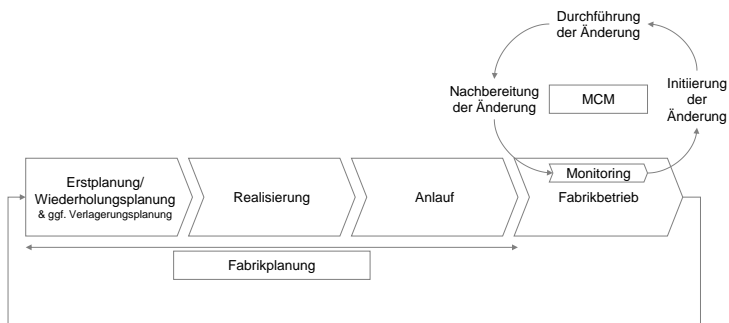


Abbildung 2.2: Einordnung des MCM in den Fabriklebenszyklus (SCHADY 2008, S. 15)

Nach MALAK & AURICH (2013, S. 350), RÖSSING (2007, S. 8) und AURICH & CICHOS (2014) können v. a. technische MCs in drei Gruppen zusammengefasst werden:

1. Rekonfigurationen von Produktionsobjekten, z. B. Maschinen oder Arbeitsplätze
2. Addition, Substitution oder Entfernung von Produktionsobjekten, z. B. Maschinen oder Werkzeuge
3. Änderungen der Beziehung zwischen Produktionsobjekten

In Verbindung mit der Fabrik als System umfasst ein MC dementsprechend alle Rekonfigurationen, Änderungen, Addition, Substitution oder Entfernung der räumlichen Anordnung, Beziehungen und Eigenschaften von Betriebsmitteln, Raum- und Gebäudetechnik, Organisation und Personal (BAUER ET AL. 2017)⁴.

Durch diese Maßnahmen werden letztendlich ablauf- und aufbauorientierte Prozessoptimierungen realisiert (SCHUH 1999, S. 110–113). Ablauforientierte Optimierungen können nach SCHUH (1999, S. 110–113) in die Gestaltungsansätze eliminieren, standardisieren, Mitteleinsatz verbessern, Varianz reduzieren, substituieren, integrieren, parallelisieren, verlagern, Iterationen vermeiden und kooperieren unterteilt werden. Es werden also die horizontalen Beziehungen von Prozessketten und -elementen sowie deren Durchführung betrachtet. Im Hinblick auf Produktionsstrukturen werden diese Anpassungen um die Möglichkeiten Reihenfolge ändern, zentralisieren/dezentralisieren, neuer Prozess und Position ändern ergänzt (POHL 2014, S. 86). Aufbauorientierte Ansätze optimieren im Gegensatz hierzu die hierarchischen Beziehungen von und die Verantwortlichkeiten für Prozessketten und -elemente (SCHUH 1999, S. 117). Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf MCs, welche eine ablauforientierte Anpassung des Produktionssystems zum Ziel haben.

Um eine Produktionsänderung als Grundlage für ihre Planung und Durchführung zu beschreiben, werden 20 allgemeine Merkmale zur Spezifikation, Charakterisierung sowie Koordination und Bewertung eines MC genutzt (KOCH 2017, S. 103)(siehe Abbildung 2.3). Eines der Merkmale stellt die Änderungsursache, welche im folgenden Abschnitt weiter spezifiziert wird, dar.

⁴ Im Folgenden werden die Begriffe Manufacturing Change (MC), Produktionsänderung und Fabrikänderung synonym verwendet.

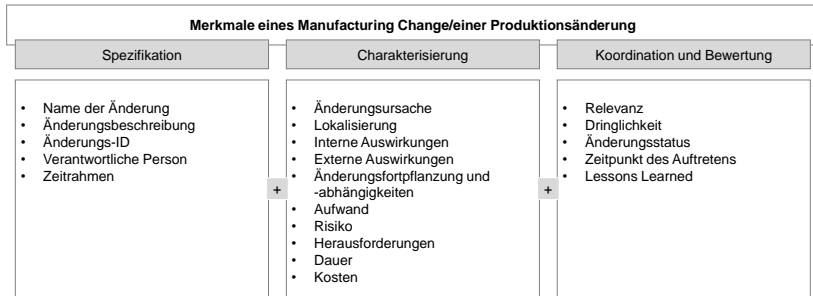


Abbildung 2.3: Merkmale eines MC (KOCH 2017, S. 103)

2.1.3 Änderungsursachen in der Produktion

Eine Änderungsursache ist ein Zustand bzw. eine grundlegende Tatsache, die einen Änderungsbedarf hervorruft (KOCH 2017, S. 20). Dabei werden in der Literatur die Begriffe Einflussfaktor, Änderungstreiber und Änderungsauslöser ähnlich oder auch synonym gebraucht (KOCH ET AL. 2016b). Aufgrund des turbulenten Umfelds von Produktionssystemen können Änderungsursachen unterschiedlichster Art auftreten.

In bisherigen Arbeiten konnten Einflussbereiche identifiziert werden, in welchen Änderungsursachen auftreten können (KOCH 2017, 97 f. HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 110). Diese lassen sich in elf Felder zusammenfassen, wobei eine Unterteilung in Änderungsursachen aus der Produktion, aus der generellen Umgebung sowie der Produktentwicklung vorgenommen wird (siehe Abbildung 2.4)(KOCH 2017, 97 f.). Es ist festzustellen, dass die relevanten Bereiche einen zyklischen Charakter aufweisen, was zu einem kontinuierlichen Anpassungsbedarf in der Fabrik führt (SCHENK ET AL. 2014, 147 ff. DÉR ET AL. 2023).

Während produktionsinterne Änderungsursachen bereits eine direkte Verknüpfung zu einzelnen Fabrikelementen aufweisen, kann für Einflüsse aus dem Fabrikumfeld oder der Entwicklung das von CISEK ET AL. (2002) eingeführte und von MÖLLER (2008, 21 ff.) weiterentwickelte Rezeptorenmodell genutzt werden, um einen konkreteren Bezug der einzelnen Änderungsursachen zur Produktion herzustellen. In diesem werden sechs Rezeptoren definiert, welche die Kanäle für den Einfluss von Änderungsursachen auf das Produktionssystem darstellen. In Anlehnung an die Biologie wird ein Rezeptor

als Empfangs- bzw. Aufnahmeeinrichtung der Fabrik für bestimmte Reize – in diesem Kontext Veränderungen des Fabrikumfelds – angesehen. Mittels der Rezeptoren Produkt bzw. Produktvarianten, Stückzahl, Zeit (Durchlaufzeit), Kosten (Stückkosten), Qualität (Fehlerrate) und Technologie können Änderungsursachen gebündelt und eine direkte Verknüpfung zum Produktionssystem ermöglicht werden (siehe Abbildung 2.4) (MÖLLER 2008, 21 ff.).

Aufgrund der zyklischen Änderungsursachen wie unter anderem den genannten Lebenszyklen, welche wiederkehrend Einfluss auf die Produktion nehmen, werden in den Rezeptoren regelmäßig Veränderungen und dementsprechend sich verändernde Anforderungen an die Fabrik erzeugt (NYHUIS 2008, 22 f. HEINEN 2011). Dies wird dadurch verstärkt, dass einzelne Events auch gleichzeitig über mehrere Rezeptoren auf die Fabrik einwirken können. Eine Einführung von neuen Umweltvorschriften mit dem Ziel, Fabrikemissionen zu verringern, kann beispielsweise dazu führen, dass Werkzeugmaschinen mit einer höheren thermischen Stabilität ohne den Einsatz komplexer Kühlsysteme entwickelt (Rezeptor Technologie), neue Materialien benötigt und Produkte (Rezeptor Produkt), die für eine Aufbereitung oder ein Remanufacturing ausgelegt sind, gestaltet werden (TOLIO ET AL. 2010). Aufbauend auf den möglichen MC (siehe Abschnitt 2.1.2) können als Reaktion auf einen Einflussfaktor wiederum verschiedene Maßnahmen umgesetzt werden. Am Beispiel des Rezeptors Stückzahl werden in HON & XU (2007) der Einsatz besserer Werkzeuge, die Substitution einer Maschine und die Einführung einer zusätzlichen Maschine untersucht, um auf steigende Stückzahlen im Laufe eines Produktlebenszyklus zu reagieren. ECHSLER MINGUILLON ET AL. (2019) analysieren Maßnahmen der Personalplanung wie z. B. Überstunden, Leiharbeitnehmer oder Personalversetzungen, um schwankende Stückzahlen effizient zu produzieren. COLLEDANI & ANGIUS (2019) beschreiben eine geeignete Produktionsplanung und -steuerung, die für eine schnelle Anpassung des Fabriksystems an sich verändernde Stückzahlen notwendig ist.

Vor dem Hintergrund dieser Vielzahl an Einflussfaktoren und möglichen Änderungsmaßnahmen fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die Betrachtung von Änderungswirkungen beginnend bei internen Änderungsursachen oder den Rezeptoren einer Fabrik zur Bündelung der weiteren Änderungsursachen, da ab hier eine konkrete Verknüpfung zum Produktionssystem und dessen Elementen möglich ist.

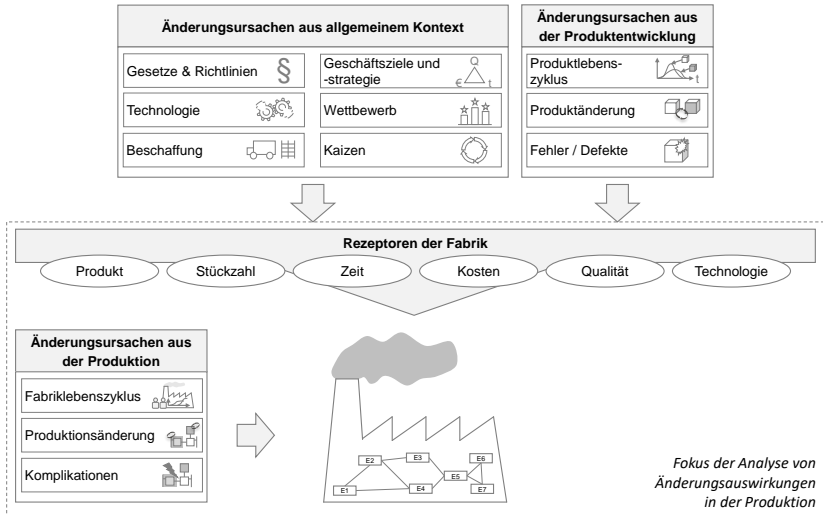


Abbildung 2.4: Änderungsursachen und Rezeptorenmodell in Anlehnung an KOCH (2017), REINHART ET AL. (2009b) und NYHUIS (2008)

2.2 Änderungsmanagement in der Produktion

Um mit Änderungsursachen und -bedarfen sowie den dadurch notwendigen Änderungen in der Produktion umzugehen, haben sich strukturierte Prozesse für das MCM etabliert.

Diese basieren auf der Definition des MCM als „die Kontrolle und Überwachung des Änderungsprozesses in der Produktion inklusive aller Maßnahmen, um Produktionsänderungen zu vermeiden, vorzuziehen, effizient zu planen, auszuwählen, umzusetzen und zu kontrollieren“ (KOCH ET AL. 2016a). Das Änderungsmanagement sollte erreichen, dass Änderungen 1) so wenig wie möglich vorkommen, 2) so früh wie möglich stattfinden, 3) effektiv ausgewählt, 4) effizient ausgeführt und 5) kontinuierlich besser umgesetzt werden (FRICKE ET AL. 2000).

Aktuelle Ansätze des MCM präsentieren Prozesse in Form von Phasenmodellen bzw. Stage-Gate-Prozessen. Die einzelnen Phasen enthalten unterschiedliche Teilaktivitäten, wobei eine nachgelagerte Phase immer die Ergebnisse der vorherigen Phase als Ausgangspunkt benötigt (AURICH ET AL. 2004; KOCH 2017).

2 Grundlagen und Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Basierend auf einer umfangreichen Literaturrecherche in den Bereichen kontinuierliche Fabrikplanung, Fabrikplanung, Produktänderungsmanagement und Produktionsänderungsmanagement sowie industriellen Studien unterteilen KOCH ET AL. (2016a) das Änderungsmanagement in der Produktion in eine proaktive, eine reaktive und eine retrospektive Phase (siehe Abbildung 2.5). Dies entspricht ebenfalls der Gliederung von RÖSSING (2007) in die Phasen Initialisierung, Durchführung und Nachbereitung. Weitere Ansätze, wie beispielsweise von PROSTEP IVIP E. V. (2014), KARL (2015) oder STANEV ET AL. (2008), können gleichermaßen in die dreiphasige Struktur eingeordnet werden.

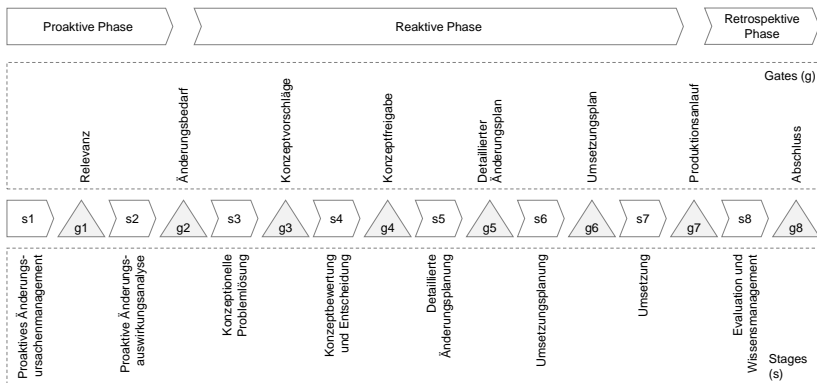


Abbildung 2.5: Stage-Gate-Prozess für das MCM (KOCH 2017, S. 111)

Insgesamt sind den einzelnen Phasen 53 Aktivitäten zugeordnet (KOCH 2017), wobei im Folgenden primär auf die einzelnen Phasen und Hauptschritte des Prozesses eingegangen wird. Der Gesamtprozess stellt einen Orientierungsrahmen für Unternehmen dar, welcher an die individuellen Herausforderungen und Gegebenheiten angepasst werden kann.

Die proaktive Phase dient der Identifizierung, Vermeidung und Verfolgung einer Änderungsursache, damit ein potenzieller MC frühzeitig erkannt und proaktiv gehandhabt werden kann (KOCH 2017, S. 111). Das **proaktive Änderungsursachenmanagement** widmet sich der Identifizierung sowie einer ersten Voruntersuchung von potenziellen Änderungen und ihren Ursachen. Basierend darauf werden ein Änderungsprofil erstellt, Zuständigkeiten verteilt und die Relevanz der potenziellen Produktionsänderung evaluiert (KOCH 2017, S. 112; STANEV ET AL. 2008). Nach der Bestätigung des Ände-

rungsbedarfs durch die **proaktive Änderungsauswirkungsanalyse** startet die Reaktive Phase des MCM.

Die Reaktive Phase beinhaltet alle Aktivitäten zur Evaluation, Planung und Durchführung einer Änderung und endet mit dem Produktionsanlauf nach der Durchführung aller Anpassungen am Produktionssystem (KOCH 2017, S. 111). In dem Prozessschritt **konzeptionelle Problemlösung** werden mehrere Lösungsalternativen erstellt. Bei der Entwicklung der **Konzeptvorschläge** werden Änderungsförpflanzungen analysiert und die notwendigen Investitionen sowie der Nutzen des MC abgeschätzt. Eine Bewertung der erarbeiteten Lösungsalternativen z. B. hinsichtlich anfallender Kosten erfolgt im vierten Schritt **Konzeptbewertung und Entscheidung**. Basierend auf der Bewertung wird die Entscheidung für ein spezifisches Lösungskonzept getroffen. Die Dokumentation wird entsprechend angepasst und die **Konzeptfreigabe** vorbereitet (KOCH 2017, S. 112). Die **detaillierte Änderungsplanung** befasst sich mit der umfassenden Beschreibung der anfallenden Aufgaben und resultierenden Arbeitspakete sowie mit der Zuteilung von benötigten Ressourcen. Die **Umsetzungsplanung** dient der Planung der Durchführung einzelner Aufgaben und Arbeitspakete sowie der Meilensteine und Kosten. Im Anschluss an die Umsetzungsplanung erfolgt die eigentliche **Umsetzung**. Die zuvor festgelegten Aufgaben und Arbeitspakete werden gemäß des Umsetzungsplans ausgeführt und kontrolliert, um etwaige Abweichungen frühzeitig zu erkennen und Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Zudem wird der Wiederanlauf der Produktion vorbereitet.

Zuletzt umfasst die retrospektive Phase alle zurückblickenden und nachbereitenden Aktivitäten, die zum Lernen aus vergangenen Änderungen notwendig sind (KOCH 2017, S. 112). Nach erfolgreicher Umsetzung der Änderung erfolgt der Prozessschritt **Evaluation und Wissensmanagement**, um die erfolgte Umsetzung der Produktionsänderung hinsichtlich der Erreichung von Zielwerten zu bewerten und den durchlaufenen Prozess zu dokumentieren. Die gewonnenen Erkenntnisse können zur Unterstützung zukünftiger MCs herangezogen werden.

Die Analyse der Änderungsauswirkungen erfolgt erstmals in der proaktiven Phase und wird bis zur Umsetzung der Änderung noch mehrmals immer detaillierter durchgeführt (siehe Abschnitt 3.1). Sie stellt eine essentielle Entscheidungsgrundlage für die einzelnen Aktivitäten des MCM-Prozesses dar und muss zu jedem Zeitpunkt des Prozesses die notwendigen Informationen über den betrachteten MC bereitstellen.

2.3 Änderungsauswirkungen und deren Analyse

Aufgrund der steigenden Komplexität und der damit verbundenen Anzahl an Vernetzungen zwischen Produktionselementen ist die Analyse von Änderungen und ihren Auswirkungen eine Herausforderung, welcher mittels strukturierter Analyseverfahren begegnet werden muss (RÖSSING 2007, S. 22; AURICH & MALAK 2010). Das Ziel der Auswirkungsanalyse ist die Unterstützung der Entscheidungen im MCM-Prozess, welche beispielsweise bezüglich der Wirtschaftlichkeit einer Änderung oder den einzuplanenden Ressourcen und Zeiträumen getroffen werden müssen (PLEHN ET AL. 2016). Je nach Einsatzgebiet der bestehenden Ansätze zur Auswirkungsanalyse werden unterschiedliche Arten von Auswirkungen betrachtet. So sind sowohl Änderungskosten als auch Zeitaufwände (PLEHN ET AL. 2016), die betroffenen Fabrikelemente (RÖSSING 2007, S. 58) oder der Einfluss auf Produktionskennzahlen (MALAK & AURICH 2013, 52 f. BAUER ET AL. 2017) in der Literatur zur Auswirkungsanalyse genannt, wobei alle Typen wiederum mittels unterschiedlicher Größen spezifiziert werden. Des Weiteren wird aufgrund der häufig frühen Planungsphase, in welcher die Auswirkungsanalyse durchgeführt wird, die Betrachtung von Unsicherheiten in der Bewertung vereinzelt aufgegriffen (PLEHN 2017).

Bei der Analyse von betroffenen Elementen und dadurch entstehenden Änderungsbedarfen können direkte und indirekte Auswirkungen differenziert werden (RÖSSING 2007, S. 16). Direkte Auswirkungen resultieren aus der direkten Vernetzung des geänderten Objekts und den davon betroffenen Objekten der Fabrik. Indirekte Auswirkungen beschreiben Beeinflussungen, die ohne eine direkte Vernetzung zwischen den Fabrikelementen entstehen. Der Vorgang, durch welchen eine Änderung am Produktionssystem eine weitere Änderung, Aktivität oder Anpassung hervorruft, wird als Änderungsfortpflanzung bezeichnet (PLEHN 2017, S. 16). Die Berücksichtigung von Änderungsfortpflanzungen ist bei der Analyse von Auswirkungen von hoher Bedeutung für die Ergebnisqualität.

Aufbauend auf bestehenden Ansätzen ist es das Ziel der vorliegenden Arbeit, ein Vorgehen für die Analyse von Änderungsauswirkungen zu erarbeiten, welches unabhängig von der Art der zu bestimmenden Auswirkungen angewendet werden kann und die benötigte Informationsgrundlage für den MCM-Prozess bereitstellt. Vor diesem Hintergrund definiert sich die Analyse von Änderungsauswirkungen als *Gesamtheit der Aktivitäten*

zur Bestimmung der erforderlichen Informationen über die Fortpflanzungen und Auswirkungen einer Änderung, um die anschließenden Planungsaktivitäten innerhalb des unternehmensindividuellen MCM-Prozesses erfolgreich durchführen zu können. Dies kann unter anderem die Identifikation von Änderungsbedarfen, betroffenen Fabrikelementen und notwendigen Änderungen sowie die Bewertung der Änderungsdauer, der Änderungskosten und der Auswirkungen auf Produktionskennzahlen beinhalten.

2.4 Modellierung von Produktionssystemen

Für die Analyse der genannten Arten von Änderungsauswirkungen werden Kenntnisse über den IST-Zustand des Produktionssystems benötigt. Um diese Informationsgrundlage nachhaltig zur Verfügung zu stellen, kann eine geeignete Systemmodellierung durchgeführt werden. Diese kann des Weiteren die Beschreibung von MCs unterstützen, wodurch die effiziente Planung und Durchführung der notwendigen Maßnahmen erleichtert wird (KOCH & HOFER 2016). Im Kontext der Modellierung werden im Folgenden die Begriffe Modell, Metamodell und Referenzmodell weiter spezifiziert, wobei deren Beziehung zueinander in Abbildung 2.6 dargestellt ist. Des Weiteren wird ein kurzer Überblick hinsichtlich verschiedener Modelle zur Darstellung von Produktionssystemen gegeben.

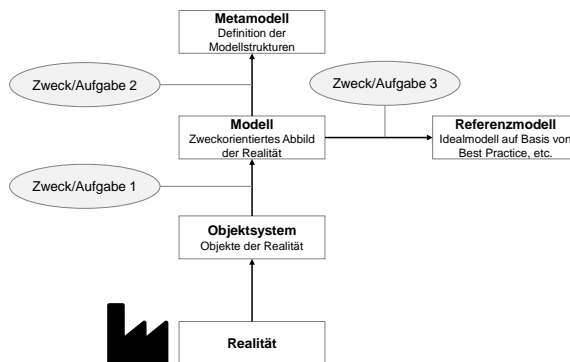


Abbildung 2.6: Modell, Metamodell, Referenzmodell (GAJEWSKI 2004, S. 17)

Modelle „dienen der Beschreibung, Erklärung, Prognose und Gestaltung von realen Systemen“ (GAJEWSKI 2004, S. 7). Ein Modell ist eine „vereinfachte Nachbildung

eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ (VDI 3633 2018, S. 19), welche „auf der Grundlage einer Struktur, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt bzw. genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist“ (DANGELMAIER 1999, S. 11). Ein Modell dient demnach als zweckorientierte, vereinfachte Darstellung eines Originals, um mit Hilfe dessen eine Lösung für ein Realproblem zu generieren. Wichtig hierbei ist, dass das Modell trotz seiner Abstraktion die wesentlichen Eigenschaften ausreichend genau darstellt, um korrekte und aussagekräftige Ergebnisse zu generieren (SCHENK ET AL. 2014, S. 220; K. FELDMANN & REINHART 2000, S. 22). Gleichzeitig muss darauf geachtet werden, den Modellierungsaufwand durch einen geeigneten Detaillierungsgrad niedrig zu halten (K. FELDMANN & REINHART 2000, S. 22).

Um dies zu erreichen, sind Modelle nach der allgemeinen Modelltheorie von STACHOWIAK (1973, 131 ff.) durch drei Merkmale gekennzeichnet: das Abbildungsmerkmal, das Verkürzungsmerkmal und das pragmatische Merkmal (siehe Abbildung 2.7). Abbildungsmerkmale kennzeichnen Modelle stets als Abbild des Originals. Dabei werden aber – entsprechend dem Verkürzungsmerkmal – nicht alle Elemente und Eigenschaften des repräsentierten Originals erfasst, sondern nur Informationen, die für die Modellerschaffenden bzw. die Modellnutzenden relevant sind (STACHOWIAK 1973, S. 132). Das pragmatische Merkmal berücksichtigt die Intention des Modellerstellers. Denn Modelle „erfüllen ihre Ersetzungsfunktion für bestimmte erkennende und/oder handelnde, modellbenutzende Subjekte innerhalb bestimmter Zeitintervalle und unter Einschränkung auf bestimmte gedankliche oder tatsächliche Operationen“ (STACHOWIAK 1973, S. 133).

Zur Erstellung eines Modells ist (wenngleich ggf. auch nur in impliziter Form) ein Metamodell notwendig (GAJEWSKI 2004, S. 17; SCHÜTTE 1998, S. 73). Dieses steht hinter bzw. über einem Modell und dient der Definition von dessen Strukturen. Metamodelle werden in diesem Sinne als „abstrakte Systeme zur Beschreibung der Konstrukte und syntaktischen Beziehungsregeln von Modellen“ (KRUSE 1996, S. 14) definiert. So können in einem Metamodell für eine graphenbasierte Modellierung von Produktionssystemen beispielsweise die Typen von Knoten (Elemente der Fabrik) und Kanten (Flussbeziehungen zwischen den Fabrikelementen) festgelegt werden (PLEHN ET AL. 2015b).

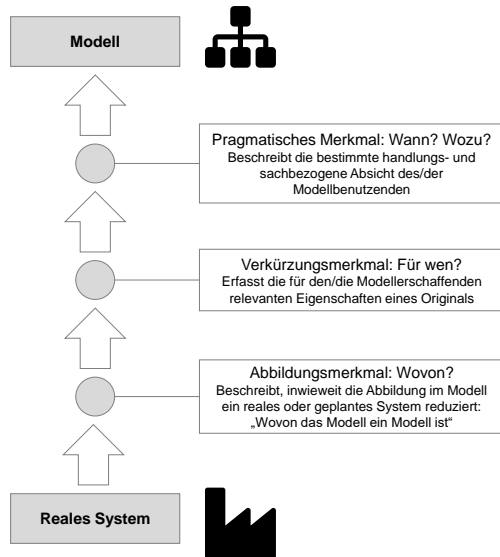


Abbildung 2.7: Merkmale eines Modells nach STACHOWIAK (1973, 131 ff.), NEUHAUSEN (2002, S. 53) und VDI 3633 (2018)

Im Gegensatz zu Metamodellen stehen sog. Referenzmodelle auf der gleichen semantischen Stufe wie Modelle (SCHÜTTE 1998, S. 72; GAJEWSKI 2004, S. 17). Dabei handelt es sich bei jedem Referenzmodell um ein Modell, das für den Entwurf anderer Modelle herangezogen werden kann (HARS 1994, S. 15). Das Ziel von Referenzmodellen ist es, durch Know-how aus vorhandenen Modellen, Fachkonzepten, Expertenbefragungen oder auf Basis von theoretischen Erkenntnissen qualitativ hochwertige Modelle zu erstellen, die Best Practice bzw. Common Practice einer Domäne in Form eines Idealmodells abbilden (SCHWEGMANN 1999, 53 f.).

Dieses Wissen über den Idealzustand wird bei der Ableitung spezifischer Modelle aus dem Referenzmodell übernommen. Ein Referenzmodell muss daher über eine gewisse Allgemeingültigkeit verfügen, aber auch schon so weit spezifiziert sein, dass es ohne Veränderung anwendbar ist (HARS 1994, S. 15).

Zur Modellierung von Produktions- und Fabrikssystemen kommen je nach Zielsetzung unterschiedliche Modelle, welche in objektorientierte, prozessorientierte sowie bildhafte

2 Grundlagen und Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

bzw. virtuelle Modelle unterteilt werden können, zum Einsatz (siehe Abbildung 2.8) (SCHENK ET AL. 2014, S. 222; SCHADY 2008, S. 28).

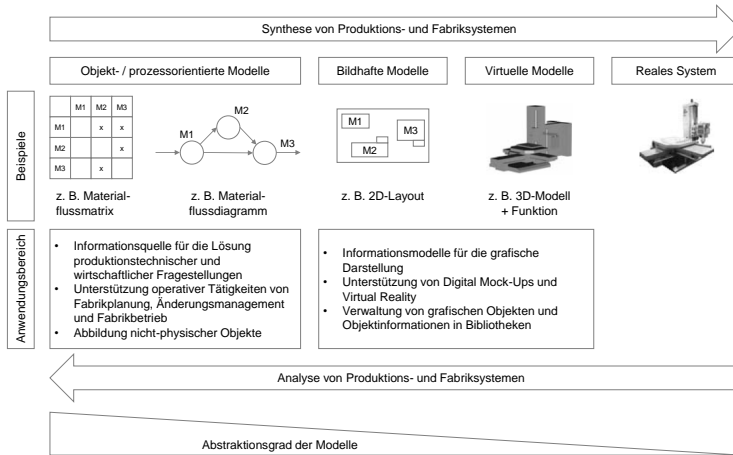


Abbildung 2.8: Übersicht verschiedener Modelle von Produktions- und Fabrikssystemen in Anlehnung an SCHENK ET AL. (2014, S. 222) und SCHADY (2008, S. 38)

Objektorientierte Modelle fokussieren die Darstellung der Elemente eines Systems und deren Definition durch allgemeine Klassen und Attribute. Sie werden durch die Eigenschaften Abstraktion, Kapselung, Modularität und Hierarchie gekennzeichnet (BOOCH 1997, S. 37). Ein Objekt stellt dabei eine Abstraktion eines Gegenstands dar und enthält beschreibende Attribute und Operationen (BOOCH 1997, S. 35; BERGHOLZ 2005, S. 93).

Zu den am weitesten verbreiteten objektorientierten Modellierungssprachen, durch welche unterschiedliche grafische Modelle erstellt werden können, gehören die Unified Modeling Language (UML) sowie die System Modeling Language (SysML) (PERRY & HOLT 2006). Der dabei zugrundeliegende Ansatz, Objekte zu Klassen zu gruppieren und mittels Attributen und Prozessen zu beschreiben, lässt sich durch eine Analogiebildung auf die Fabrikplanung übertragen und ermöglicht somit die Spezifikation von Systemen und Prozessen innerhalb der Produktion (BERGHOLZ 2005, 87 f.).

So stellt beispielsweise SysML4Mechatronics eine Weiterentwicklung der SysML zur

Nutzung für mechatronische Systeme unter Berücksichtigung derer Besonderheiten dar (KERN SCHMIDT & VOGEL-HEUSER 2013). Daneben stellt die graphenbasierte Fabrikmodellierung von PLEHN ET AL. (2015b) ein Metamodell von Klassen für Fabrikelemente (Knoten) und Flussverbindungen (Kanten) zur Verfügung.

Im Bereich der prozessorientierten Modellierung sind im Kontext der Produktion beispielsweise Materialflussmatrizen und -diagramme (DANGELMAIER 1999, S. 317–330), Wertstromdarstellungen (ERLACH 2010) – welche mittlerweile auch zur Wertstromanalyse 4.0 weiterentwickelt wurden (MEUDT 2020; MEUDT ET AL. 2016) – sowie Flusssystem-Darstellungen (SCHENK ET AL. 2014, S. 125–130) zu nennen. Dabei wird der Fokus auf das Verständnis und den Ablauf des Produktionsprozesses an sich und einzelne Analyseschwerpunkte wie z. B. die Verschwendungsanalyse gelegt.

Virtuelle bzw. bildhafte Darstellungen von Fabrik- und Produktionssystemen werden häufig mittels 2D- oder 3D-Layouts und Virtual Reality umgesetzt (SCHADY 2008, 36 ff.). Dabei steht besonders die Betrachtung der räumlichen Anordnung der Fabrikobjekte im Vordergrund.

Eine Modellierung von Abhängigkeiten in Form von Matrizen wird vor allem zur Analyse von Änderungen im Bereich der Produktentwicklung häufig vorgeschlagen (BRAHMA & WYNN 2023). Dabei kommen die Design-Structure-Matrix (DSM), die Domain-Mapping-Matrix (DMM) und die Multiple-Domain-Matrix (MDM) als Methoden zum Einsatz, welche unterschiedliche Strukturanalysen ermöglichen (KATTNER 2020, S. 38; EPPINGER & BROWNING 2012). Während es die DSM erlaubt, Elemente der gleichen Domäne und deren Relationen abzubilden, können Vernetzungen von Elementen unterschiedlicher Domänen (z. B. Produkt und Produktion) mit einer DMM und einer MDM dokumentiert werden (LINDEMANN ET AL. 2009, S. 50; KATTNER 2020, S. 38)(siehe Abbildung 2.9). Die Art der Abhängigkeit und deren Spezifizierung bzw. Quantifizierung kann dabei je nach Anwendungsfall frei gewählt werden (BROWNING 2001). So werden in der Analyse von Änderungsauswirkungen von (CLARKSON ET AL. 2004) z. B. Wahrscheinlichkeiten, Auswirkungen und Risiken in den Matrizen aufgenommen.

Weitere Modellierungsmethoden, welche im Kontext der Analyse von Änderungen genannt werden, sind unter anderem (Fuzzy) Cognitive Maps (PLEHN 2017) und Kennzahlensysteme (BAUER ET AL. 2017; MALAK & AURICH 2013). Eine Cognitive Map

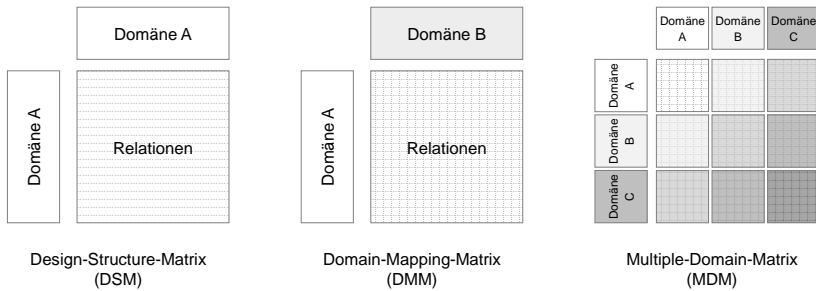


Abbildung 2.9: DSM, DMM und MDM als matrixbasierte Modellierungsmethoden (LINDEMANN ET AL. 2009, S. 50; KATTNER 2020, S. 38)

eignet sich zur graphenbasierten Darstellung von kausalen Beziehungen zwischen Elementen (KOSKO 1986, S. 65). Die Visualisierung erfolgt mittels Knotenpunkten, welche Kennzahlen oder Aktivitäten repräsentieren, und Pfeilen, welche die kausalen Beziehungen darstellen (AXELROD 2015; HALL ET AL. 1994). Als Kennzahlensystem gilt „eine geordnete Gesamtheit von Kennzahlen, die in einer Beziehung zueinander stehen und so als Gesamtheit über einen Sachverhalt vollständig informieren“ (HORVÁTH 2012, S. 501). Kennzahlen-Ordnungssysteme dienen in diesem Kontext dazu, Kennzahlen nach Sachverhalten zu unterteilen, während Kennzahlen-Rechensysteme Kennzahlen in einer hierarchischen Struktur mathematisch miteinander verknüpfen (HORVÁTH 2016, S. 4, 2012, S. 501)

2.5 Unschärfe und Unsicherheit im Kontext von Änderungen in der Produktion

Da die Analyse von Änderungsauswirkungen immer die Betrachtung eines zukünftigen Zustandes umfasst und bereits zu einem frühen Planungsstand (erstmalig in der proaktiven Phase des MCM) erfolgt, sind die notwendigen Modellierungen sowie die Analyseergebnisse von Unsicherheit und Unschärfe geprägt. Dies gilt insbesondere für alle Werte, welche durch die Befragung von Expert*innen erhoben werden (PLEHN ET AL. 2016).

Eine unsichere Analyse liegt vor, wenn die Entscheidenden mehrere Entwicklungen für möglich halten, von welchen jedoch nur eine eintreten wird (LAUX ET AL. 2018, S. 35).

Betrifft dieser Zustand quantitative Kriterien, wird auch von stochastischer Unsicherheit gesprochen (KREBS 2012, 20 f.). Unscharfe Informationen liegen insbesondere bei qualitativen Kriterien vor, bei welchen beispielsweise das Verständnis mehrerer Personen von einer Bewertung unterschiedlich ist. Somit wird auch häufig von linguistischer Unsicherheit bzw. Unschärfe gesprochen (SCHÖNMANN 2019, S. 62; HAWER 2020, 15 f.). Sowohl Unsicherheit als auch Unschärfe in Analyseergebnissen führen dazu, dass die Entscheidungen – also im Fall des Änderungsmanagements beispielsweise die Entscheidung über die Wirtschaftlichkeit und die Durchführung einer Änderung – mit Risiken verbunden sind (KREBS 2012, S. 21).

Um die Entscheidungen im MCM trotz allem möglichst umfassend vorzubereiten und eine ausreichende Informationsbasis zu liefern, gilt es, die Unsicherheiten und die Unschärfe in der Analyse geeignet zu modellieren und abzufragen.

Im Allgemeinen können dabei die Fuzzy-Mengen-Theorie, Intervalle und Wahrscheinlichkeitsverteilungen als Modellierungstechniken zum Einsatz kommen (HAWER ET AL. 2018). HAWER ET AL. (2018) stellen zur Auswahl eines geeigneten Modellierungsverfahrens einen Fragen- bzw. Entscheidungskatalog in Form eines Flussdiagramms zur Verfügung.

Während die Betrachtung von HAWER ET AL. (2018) die möglichen Modellierungsarten fokussiert, werden in anderen Arbeiten die Vorgehensweisen zur Befragung von Expert*innen analysiert. Dabei werden insbesondere unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen und deren Abfrage behandelt (MORRIS ET AL. 2014). Eine weit verbreitete Methode, welche bereits bei der Analyse von Änderungsauswirkungen angewendet wurde, ist die Program Evaluation and Review Technique (PERT) (PLEHN 2017, 103 f.). Dabei wird auf Basis von Expertenschätzungen zu dem optimistischsten Szenario, dem pessimistischsten Szenario sowie dem wahrscheinlichsten Szenario eine Beta-Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Modellierung der Unsicherheit bestimmt (MALCOLM ET AL. 1959).

2.6 Process Tailoring und Modularisierung

Das Tailoring beschreibt die Anpassung und Spezifizierung einer allgemeinen Beschreibung für die Nutzung in einer alternativen, weniger generellen Umgebung (GINSBERG & QUINN 1995, S. 3). Im Kontext des Process Tailoring umfasst dies die Anpassung eines

Standard- bzw. Referenzprozesses auf die unternehmens- und fallspezifischen Gegebenheiten (HOLLAUER 2019; KALUS 2013; MARTÍNEZ-RUIZ ET AL. 2012; PEDREIRA ET AL. 2007; YOON ET AL. 2001).

Um ein Process Tailoring zu ermöglichen, muss ein Prozess zunächst so gestaltet werden, dass eine notwendige Adaption mit überschaubarem Kosten- und Zeitaufwand umsetzbar ist (GNATZ 2005; HOLLAUER 2019; KALUS 2013). Ein Verfahren, um diese individuelle Prozessanpassung zu ermöglichen, stellt die Modularisierung dar (HOLLAUER 2019; LÉVÁRDY & BROWNING 2009; MEISSNER & BLESSING 2006).

Die Modularisierung von Systemen ist im Bereich des Komplexitätsmanagements als eine Methode zur Komplexitätsreduktion und Komplexitätsbeherrschung verbreitet (WILDEMAN 2014, 77ff. MEYER ET AL. 2007, S. 65). Das Ziel ist hierbei die Erzeugung von Modularität, d. h. dass das „System aus relativ unabhängigen Modulen gestaltet wird, die dennoch als System zusammenwirken“ (GÖPFERT 1998, S. 53; KRAUSE & GEBHARDT 2018, S. 274). Die einzelnen Module können dabei durch eine minimale Zahl an standardisierten Schnittstellen miteinander verbunden werden (LANGLOIS 2002, S. 19; CIRP 2012, S. 380).

Die Module sind Einheiten, welche mit „eindeutigen Einfluss- bzw. Funktionszuordnungen (d. h. Einflüsse wirken nur auf diese Einheit bzw. die Funktionen werden nur durch diese Einheit erfüllt) (...) frei untereinander kombinierbar bzw. austauschbar sind“ (NEUHAUSEN 2002, S. 13). Zusammenfassend kann die Modularisierung als „zielorientierte Entwicklung der Modularität (...) mit der konkreten Festlegung von Modulen und ihren Schnittstellen“ (KRAUSE & GEBHARDT 2018, S. 274) definiert werden.

Die Modularisierung von Prozessen wird insbesondere dann als sinnvoll angesehen, wenn eine Vielzahl an heterogenen Inputs und Nachfragen – wie auch bei der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion – vorliegt, da in diesen Fällen eine individuelle Konfiguration die notwendige Prozessflexibilität bietet (DING & JIE 2008; SCHILLING 2000). Die angestrebten Vorteile einer Prozessmodularisierung sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Für die Durchführung einer Modularisierung beschreiben GEBHART ET AL. (2016, S. 124) ein allgemeines Vorgehen, welches in vier Schritte unterteilt ist (siehe Abbildung 2.10).

Tabelle 2.1: Vorteile der (Prozess-)Modularisierung (GÖPFERT 1998, S. 151–157; GRUNWALD 2002, S. 73)

Vorteil	Beschreibung
Abgrenzbarkeit	Relativ autonome Bearbeitung von Teilprozessen
Standardisierbarkeit	Schaffung wiederverwendbarer generischer Standardprozesse
Wiederverwendung	Rückgriff auf vorhandene Prozesse und Erfahrungen
Kombinierbarkeit	Schnelle flexible Konfiguration von Gesamtprozessen
Erweiterbarkeit	Situative bedarfsspezifische Erweiterung durch Hinzufügen von modularen Prozessen
Kontrollierbarkeit	Einfache Erfolgskontrolle durch zurechenbare Leistung
Hierarchisierung	Komplexitätsreduktion durch Strukturierung der Prozesse; Ausgliederung oder Detaillierung kritischer Teilprozesse
Prozessstabilität	Veränderungen bleiben auf einzelne, modulare Teilprozesse begrenzt



Abbildung 2.10: Allgemeines Vorgehen zur Modularisierung (GEBHART ET AL. 2016; KRAUSE & GEBHARDT 2018)

In der **Dekomposition** erfolgt zunächst eine Zergliederung des Systems in geeignete Einheiten, wobei in diesem Zuge auch die Detaillierungsebene für die Modularisierung festgelegt wird (KRAUSE & GEBHARDT 2018, S. 131; GEBHART ET AL. 2016, S. 124). In der **Analyse** werden die Systembestandteile hinsichtlich sinnvoller Gruppierungen untersucht. Dabei werden unter anderem technisch-funktionale, organisatorische und prozessuale Aspekte betrachtet (KRAUSE & GEBHARDT 2018, S. 132). Die **Bildung der Module** erfolgt anschließend im dritten Schritt bevor in Schritt vier das Gesamtsystem in die **modularisierte Struktur überführt** wird (GEBHART ET AL. 2016, S. 124; KRAUSE & GEBHARDT 2018, 133f.).

Für den konkreten Aufbau eines Prozessmoduls führen MURR (1999, S. 49) und GRUNWALD (2002, S. 75) sogenannte (Geschäfts-)Prozessbausteine bzw. -module (siehe Abbildung 2.11) ein.

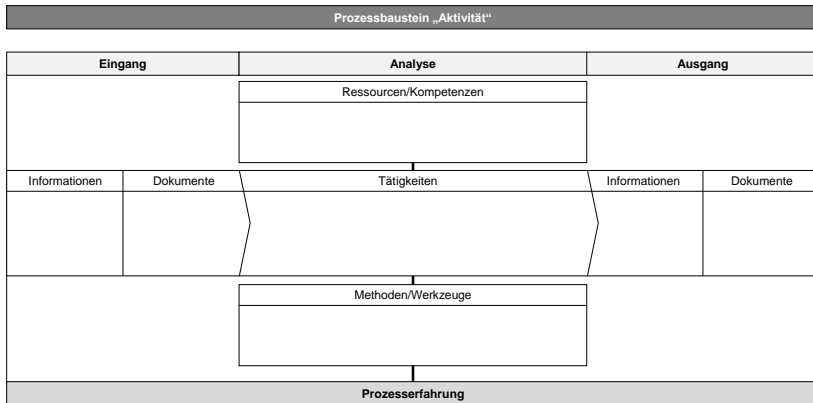


Abbildung 2.11: Prozessbaustein in Anlehnung an GRUNWALD (2002) & REINHART & GRUNWALD (2001)

Ein Prozessbaustein besteht aus einer durchzuführenden Aktivität sowie definierten Eingangs- und Ausgangsinformationen bzw. -dokumenten als Schnittstellen (REINHART & GRUNWALD 2001). Zur Spezifizierung der Aktivität werden in einem Modul neben der Tätigkeit die notwendigen Ressourcen, Kompetenzen, Methoden und Werkzeuge hinterlegt. Zusätzlich können Prozesserfahrungen zur Vereinfachung der wiederholten Durchführung eines Bausteins dokumentiert werden. Wird aus den einzelnen Prozessbausteinen ein neuer Prozess generiert (Process Tailoring), muss die Vernetzung der Bausteine methodisch unterstützt werden (GRUNWALD 2002, 81 ff.). Die Unterstützung soll die Prozessplanung u. a. durch Vorschläge und Restriktionen für Prozessreihenfolgen und -alternativen vereinfachen und einen Abgleich zwischen Informationsbedarf und -angebot ermöglichen.

2.7 Herausforderungen bei der Auswirkungsanalyse von zyklischen Änderungen im Kontext der Produktion

Die Analyse von Änderungsauswirkungen ist essentieller Bestandteil des MCM. Strukturierte Prozesse und Analysemethoden zielen darauf ab, eine effiziente und erfolgreiche Durchführung von MCs im Fabrikbetrieb zu ermöglichen. Bedingt durch den Kontext der Produktion und die Diversität von Änderungen sind bei der Konzeption der Ana-

lyse eine Vielzahl an Herausforderungen zu berücksichtigen, welche in dieser Arbeit adressiert werden sollen:

- **Komplexität von Produktionssystemen:** Aufgrund des Umfangs und des hohen Vernetzungsgrads der Elemente eines Produktionssystems ist es für einzelne Expert*innen kaum möglich, das gesamte System ganzheitlich zu bewerten. Zur Reduktion der Komplexität für die Analyse von Änderungsauswirkungen müssen Modellierungsmethoden ausgewählt oder entwickelt werden, welche die Komplexität reduzieren und trotz dessen eine ganzheitliche Analyse ermöglichen.
- **Vielfältigkeit von Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen:** Die Komplexität der Analyseaufgabe wird zudem dadurch verstärkt, dass unterschiedliche Ausprägungen und Arten von Änderungsauswirkungen bestehen. Des Weiteren ist die Änderungsfortpflanzung ein weiterer Aspekt, der zur Vielseitigkeit von Änderungsauswirkungen beiträgt. Die Auswirkungsanalyse muss ein ganzheitliches Bild eines MC vermitteln und dementsprechend alle Arten von Auswirkungen und alle Änderungsfortpflanzungen berücksichtigen.
- **Einbindung in den individuellen MCM-Prozess:** Die Analyse von Änderungsauswirkungen ist an unterschiedlichen Zeitpunkten des MCM-Prozesses möglich, wobei der Prozess und der Einsatz der Analyse unternehmensindividuell sind. Ein Analyseverfahren muss in den unternehmensspezifischen Prozess eingebunden werden und diesen bestmöglich unterstützen.
- **Fallspezifischer Informationsbedarf:** Je nach Anwendungsfall der Auswirkungsanalyse – insbesondere je nach der Einbindung in den MCM-Prozess – muss die Analyse unterschiedliche Typen von Auswirkungen auf unterschiedlichem Detaillierungsgrad betrachten, um die anstehenden Entscheidungen und Planungsschritte zu unterstützen. Eine flexible Anpassung der Zielgröße und des Umfangs der Analyse ist dementsprechend notwendig.
- **Wiederkehrender Änderungsbedarf:** Aufgrund des zyklischen Verhaltens der Änderungsursachen werden über die Rezeptoren der Fabrik regelmäßig Änderungsbedarfe nach wiederkehrenden Mustern hervorgerufen. Somit müssen auch die Auswirkungsanalysen wiederholt durchgeführt werden. Die einzelnen Bestandteile sind dementsprechend möglichst so zu gestalten, dass insbesondere vorbereitende Tätigkeiten wie die Systemmodellierung wiederverwendbar sind.

- **Fallspezifische Rahmenbedingungen:** Neben den Zielsetzungen der Analyse unterscheiden sich auch die grundlegenden Rahmenbedingungen von Anwendungsfall zu Anwendungsfall. So ist beispielsweise die Komplexität der Fabrik bzw. des betrachteten Fabrikbereichs stark von dem jeweiligen Unternehmen abhängig. Aber auch die Komplexität der MCs, die verfügbare Zeit für die Analyse sowie die Häufigkeit der MCs beeinflussen die geeignete Gestaltung der Auswirkungsanalyse.
- **Unsicherheiten und Unschärfe:** Die Planung von MCs bedarf einer Abschätzung zukünftiger Entwicklungen, wobei auch eine Vielzahl an Befragungen von Expert*innen notwendig ist. Es werden dabei sowohl die Wahrscheinlichkeit des Eintritts von Ereignissen – wie der Änderungsfortpflanzung – als auch Bewertungen z. B. hinsichtlich der Entwicklung von Produktionskennzahlen oder Kosten unter Unsicherheit/Unschärfe betrachtet.

Bestehende Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen adressieren einzelne der genannten Herausforderungen und präsentieren Analyseverfahren für den Einsatz in unterschiedlichen Anwendungsfällen. Eine detaillierte Betrachtung dieser Verfahren erfolgt in Kapitel 3.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Aufbauend auf der grundlegenden Definition der Auswirkungsanalyse von Änderungen in der Produktion sowie den Herausforderungen bei ihrer Umsetzung werden im Rahmen dieses Kapitels konkrete, bestehende Lösungsansätze vorgestellt. Einerseits können im Stand der Wissenschaft relevante Methoden als Bestandteil von MCM-Prozessen gefunden werden (siehe Abschnitt 3.1), wobei die Beschreibung des Analysevorgehens häufig keinen Inhalt darstellen. Andererseits besteht im Bereich der Produktion einschlägige Literatur, die die Auswirkungsanalyse und die Bewertung bzw. Entwicklung von Änderungsalternativen – häufig auch kombiniert unter dem Begriff der Änderungsplanung – behandelt (siehe Abschnitt 3.2). Die Verknüpfung der Rezeptoren der Fabrik mit dem Produktionssystem ist des Weiteren Teil der Identifikation von Änderungsbedarfen, wobei hierzu ebenso Vorgehen in MCM-Prozessen (siehe Kapitel 3.1) als auch alleinstehende Methoden (siehe Kapitel 3.2) zu finden sind.

Um die Betrachtung der in Abschnitt 2.7 genannten Herausforderungen zu ermöglichen, werden in der Beschreibung der Analyseansätze des Stands der Wissenschaft und Technik die folgenden Aspekte zusammengefasst:

1. Zielsetzung der Analyse
2. Art der betrachteten Änderungen (Objekt, Komplexität, Häufigkeit, etc.)
3. Einbindung in den MCM-Prozess
4. Genutzte Modellierungsmethoden zur Komplexitätsreduktion
5. Genutzte Analyseverfahren zur Bewertung von Auswirkungen
6. Berücksichtigung von Änderungsfortpflanzung
7. Berücksichtigung von Unsicherheit und Unschärfe

In Kapitel 3.3 werden die vorgestellten Ansätze abschließend hinsichtlich der Herausforderungen aus Abschnitt 2.7 bewertet und der resultierende Handlungsbedarf aufgezeigt.

Neben der detailliert beschriebenen Literatur aus dem Bereich der Produktion ist die Analyse von Änderungsauswirkungen auch in der Produktentwicklung im Zuge des ECM ein wichtiges Themengebiet¹. Eine umfangreiche Recherche und Kategorisierung der bestehenden Ansätze im ECM wurde von BRAHMA & WYNN (2023) vorgenommen (siehe Anhang A.2)². Dabei wird auch für den Bereich der Produktentwicklung deutlich, dass die Analyse von Änderungsauswirkungen in einer Vielzahl an Anwendungsfällen und für verschiedenste Zielsetzungen unter Einsatz von diversen Methoden und Modellen durchgeführt wird. Da die grundlegenden Ziele und Methoden starke Überschneidungen mit den Ansätzen der Produktion – welche den Fokus der vorliegenden Arbeit darstellen – aufweisen, werden die Konzepte des ECM nicht detailliert erläutert. Trotz dessen stellen die Erkenntnisse aus der Produktentwicklung vor allem hinsichtlich der möglichen Modelle und Analyseverfahren eine wichtige Basis für die Ansätze im Bereich des MCM dar³.

3.1 MCM-Prozesse und in diese integrierte Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen

Wie in Kapitel 2 beschrieben, wurde von KOCH (2017) ein gesamtheitlicher MCM-Prozess auf der Basis von einer umfangreichen Literaturrecherche und mehreren Expertenbefragungen erarbeitet. Der Prozess ist für die Gesamtheit der MCs nutzbar. Die

¹ Zudem ist die Softwareentwicklung als ein Bereich, in welchem die Analyse von Änderungsauswirkungen eine wichtige Rolle spielt, zu nennen. Eine Übersicht der relevanten Strömungen zur Auswirkungsanalyse in der Softwareentwicklung ist in LEHNERT (2015) zu finden. Da die Methoden aufgrund ihres abweichenden Fokus – der Analyse von Quellcode – in der Regel kaum übertragbar sind, werden diese Ansätze nicht genauer beschrieben.

² Eine detaillierte Auflistung aller Konzepte und deren Kategorisierung stellen BRAHMA & WYNN (2023) unter folgendem Link zur Verfügung: <https://doi.org/10.1007/s00163-022-00395-y>.

³ Beispielsweise sind die Nutzung von Matrizen zur Dokumentation von Abhängigkeiten aufbauend auf CLARKSON ET AL. (2004) oder der Einsatz von graphenbasierten Modellen zur Visualisierung von Vernetzungen (siehe z. B. PASQUAL & WECK (2012)) auch im MCM verbreitet. Aktuellere Konzepte untersuchen in der Produktentwicklung die Analyse von Änderungsdaten (siehe z. B. KATTNER (2020) & M. WICKEL (2017)), was im Bereich der Produktion jedoch erst vereinzelt betrachtet wurde.

Analyse von Änderungsauswirkungen wird in diesem Prozess an diversen Zeitpunkten in der reaktiven und proaktiven Phase des MCM eingebunden.

Eine erste Wirkungsanalyse mit dem Fokus auf der Untersuchung der Änderungursache erfolgt in der proaktiven Phase des MCM in der Stage 2 (KOCH 2017, S. 209). Dabei soll bestimmt werden, welche Elemente der Fabrik von der Änderungursache potenziell betroffen sind. Dies ist die Grundlage für die anschließende Erstellung des Änderungsprofils, welches zunächst Basisinformationen wie unter anderem einen Namen, eine Kurzbeschreibung sowie die Nennung der Änderungursache beinhaltet. Mit Hilfe der beeinflussten Elemente werden in dieser Phase zudem die relevanten Stakeholder, welche über den MC informiert werden müssen, identifiziert. Anschließend erfolgt eine weitere Spezifizierung der Auswirkungen der Änderung. Hierfür werden die Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) sowie eine detaillierte Analyse der Anforderungen an das Produktionssystem und der Abgleich mit dem aktuellen Zustand der Fabrik als Methoden vorgeschlagen. Die hierdurch bestimmten und konkretisierten Änderungsbedarfe sind die Grundlage für die abschließende Entscheidung der proaktiven Phase über die Durchführung des MC und die Erstellung eines Änderungsantrags.

Zu Beginn der reaktiven Phase des MCM-Prozesses werden Änderungskonzepte entwickelt, wobei für jede Alternative eine Wirkungs- und Fortpflanzungsanalyse durchgeführt wird (Stage 3)(KOCH 2017, 210 f.). Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Identifikation von weiteren Produktions- und Produktänderungsbedarfen, welche durch das betrachtete Änderungskonzept hervorgerufen werden. Basierend auf der Kenntnis aller Änderungen, welche die einzelnen Alternativen mit sich bringen, werden anschließend die Stakeholder überprüft und ggf. angepasst sowie die Investitionskosten und der Nutzen der Änderungsalternativen bestimmt.

In Stage 4 erfolgt eine detaillierte Kosten- und Zeitplanung für die favorisierten Lösungen und das finale Konzept wird ausgewählt. Die ganzheitliche Änderungsplanung wird für das ausgewählte Änderungskonzept durchgeführt, bevor die Implementierung startet (Stage 5 und 6)(KOCH 2017, S. 212).

Da der Fokus von KOCH (2017) auf dem übergeordneten MCM-Prozess liegt, erfolgt keine genauere Beschreibung der einzelnen Analysen hinsichtlich möglicher Methoden und Modelle. Somit wird auch auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe nicht eingegangen.

MCM-Prozesse, welche ebenso als Grundlage in den Prozess von Koch eingeflossen sind, wurden von PROSTEP IVIP E.V. (2014), RÖSSING (2007), MALAK & AURICH (2013) und STANEV ET AL. (2008) beschrieben, wobei letzterer keine genauere Prozessbeschreibung und Einordnung der Auswirkungsanalyse beinhaltet.

Der von PROSTEP IVIP E.V. (2014) vorgestellte MCM-Referenzprozess ist zur Handhabung der Gesamtheit an Änderungen in der Produktion in die Phasen Erfassung, Bewertung sowie Dokumentation und Durchführung gegliedert. Die ersten beiden Phasen dienen zu Erarbeitung eines Manufacturing Change Request (Änderungsantrag), welcher nach Genehmigung zu einer Manufacturing Change Order (Änderungsauftrag) wird (PROSTEP IVIP E.V. 2015). Die Analyse von Änderungsauswirkungen dient im Rahmen der Änderungserfassung der Identifikation der betroffenen Elemente und der Abschätzung des Bearbeitungszeitraumes. Auf die Vorgehensweise zur Bestimmung dieser Informationen wird von PROSTEP IVIP E.V. (2015) jedoch nicht weiter eingegangen.

Die Arbeit von RÖSSING (2007) fokussiert sich auf technische Änderungen in der Produktion. Der Prozess gliedert sich dabei in die Initialisierung, Durchführung und Nachbereitung der Änderung (RÖSSING 2007, S. 54; AURICH ET AL. 2004) (siehe Abbildung 3.1). Die Analyse von Änderungsauswirkungen erfolgt dabei im Schritt „Analyse des Änderungsbedarfs“ und liefert die Informationsbasis für die Formulierung des Änderungsantrags für den Genehmigungsprozess (RÖSSING 2007, S. 55). Eine Übertragung des Ansatzes für die Nutzung von Virtual Reality wird des Weiteren von AURICH & RÖSSING (2007) beschrieben.

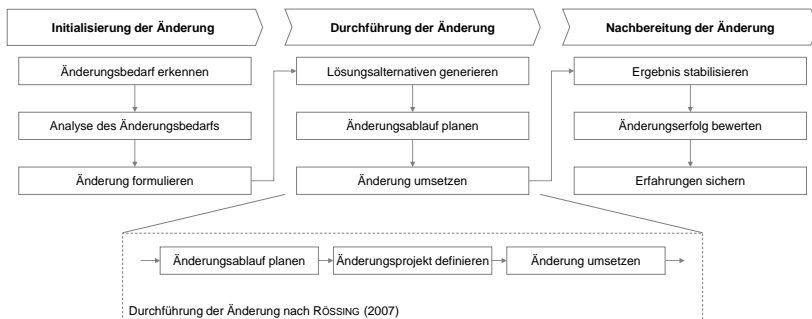


Abbildung 3.1: Änderungsmanagementprozess nach RÖSSING (2007, S. 54) und AURICH ET AL. (2004)

Grundlegende Änderungsbedarfe werden mittels Workshops, FMEA und kontinuierlichen Verbesserungs- oder Feedbackprozessen erkannt und in einen Änderungsvorschlag überführt (RÖSSING 2007, 55 f.). Der Vorschlag soll bereits unmittelbar betroffene Produktionsobjekte und deren zu ändernde Attribute enthalten und stellt den Startpunkt der Auswirkungsanalyse dar (RÖSSING 2007, 56 f.). Die Auswirkungsanalyse bzw. Analyse des Änderungsbedarfs beinhaltet die Identifikation der betroffenen Produktionsobjekte, die Definition der notwendigen Schritte zur Umsetzung der Änderung und die Abschätzung von Kosten- und Zeitaufwand für die Umsetzung (RÖSSING 2007, S. 58–64).

Zur Analyse der betroffenen Produktionsobjekte werden mit Hilfe von Arbeitsplänen die direkt betroffenen und anschließend die vor- und nachgelagerten Produktionsobjekte identifiziert. Die Vernetzung der Objekte wird zunächst mit Hilfe einer Tabelle und anschließend als Graphenmodell visualisiert, wobei die Anzahl der erkannten Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen als Vernetzungsintensität auf eine Skala von null bis zwei normiert und eingetragen wird. Im Rahmen eines Workshops werden irrelevante Vernetzungen entfernt und relevante Vernetzung mittels der Art der Vernetzung, der Konsequenzen für die Änderung und der Randbedingungen für die Änderungs-umsetzung spezifiziert. Auf Basis des verbleibenden Vernetzungsgraphens werden Auswirkungs- und Auswirkungspfadintensitäten bestimmt, wobei Entfernungsfaktoren berücksichtigt werden. Letztendlich können die betroffenen Produktionsobjekte und somit die einzubeziehenden Personen identifiziert werden. Des Weiteren können auf Basis der Auswirkungsintensitäten zu fokussierende Produktionsobjekte für die Änderungsplanung bestimmt werden.

Die Definition der notwendigen Schritte zur Umsetzung der Änderung erfolgt im Rahmen eines Workshops mit allen verantwortlichen Personen. Dabei werden Maßnahmen, Aktionen und Aufgaben aufgelistet und beschrieben sowie die zu erfüllenden Randbedingungen notiert. Die Kosten- und Zeitaufwände für die notwendigen Maßnahmen werden ebenfalls im Zuge des Workshops abgeschätzt. Der Kostenaufwand wird dabei durch die Summe der Personalkosten – geschätzter Zeitaufwand für die Umsetzung multipliziert mit den Personalkostensätzen – und der Investitionskosten bestimmt.

Die Ergebnisse der Analyse werden anschließend in den Änderungsantrag eingetragen und sind nach der Genehmigung der Änderung insbesondere für die Bestimmung der Verantwortlichen, die Zusammenfassung von ähnlichen Änderungen und die Terminierung

der Änderungsdurchführung relevant (RÖSSING 2007, S. 64–74). Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe erfolgt nicht.

MALAK & AURICH (2013) beschreiben eine Methode zur softwarebasierten Planung technischer Änderungen in der Produktion und bauen damit auf der Arbeit von RÖSSING (2007) auf. Die Methode umfasst den kompletten MCM-Prozess von der Bewertung über die Planung zur Durchführung und Nachbereitung (MALAK 2013, 51 f.) (siehe Abbildung 3.2).

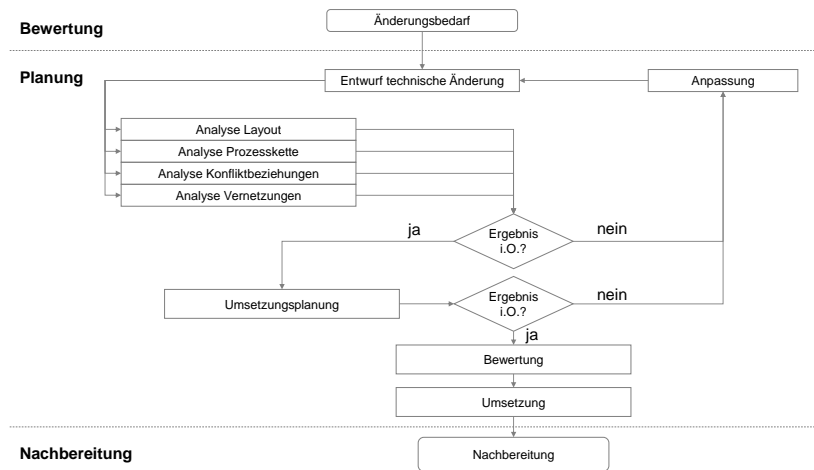


Abbildung 3.2: Änderungsmanagement nach MALAK (2013)

Die Identifizierung des Änderungsbedarfs erfolgt durch den Abgleich der Eigenschaften des Produktionssystems mit den von der Änderung gestellten Anforderungen. Bei singulären Ereignissen wie neuen Produkten, Qualitätsproblemen oder altersbedingtem Ersatz von Betriebsmitteln können Änderungsbedarfe einfach und manuell identifiziert werden (MALAK 2013, S. 52). Anforderungen, die sich über die Zeit verändern, werden mittels Kennzahlen zur Messung der Leistung, der Auslastung und der Stückkosten des Produktionssystems überwacht (MALAK 2013, 52 f.). Der Änderungsbedarf wird mittels einer definierten Beschreibungslogik in einen Entwurf der technischen Änderung überführt, bevor die Analyse der Änderungsauswirkungen erfolgt (MALAK 2013, S. 55–58).

Die Auswirkungsanalyse betrachtet die Vollständigkeit der technischen Änderung, die Layoutverträglichkeit, die Auswirkungen auf die Prozesskette und mögliche Konflik-

te zwischen den Betriebsmitteln mit dem Ziel, ein ganzheitliches und umsetzbares Änderungskonzept zu erarbeiten und keine erneuten Anpassungen im Rahmen der Durchführung zu riskieren (MALAK 2013, S. 58–70).

Bezüglich der Vollständigkeit des Systems wird überprüft, ob durch die Änderung die notwendigen Material- oder Informationsflüsse unterbrochen werden. Hierfür erfolgt eine Vernetzungsanalyse und ggf. eine Anpassung der Änderung, um die Vollständigkeit herzustellen. Hinsichtlich des Layouts werden bei Positionsänderungen von Betriebsmitteln oder Anpassungen des Gebäudes die Anforderungen Verankerungsmöglichkeit, Ver- und Entsorgung, Dimension und Tragfähigkeit sowie weitere Sonderanforderungen überprüft. Zur Bewertung des Einflusses auf die Prozesskette werden die IST- sowie PLAN-Durchlaufzeit, -Stückkosten und -Kapazitätsauslastung bestimmt und miteinander verglichen. Des Weiteren wird die Einhaltung von definierten Grenzwerten überprüft. Die Analyse von Konflikten zwischen Betriebsmitteln erfolgt qualitativ. Dabei werden konfliktauslösende Attribute – wie z. B. starke Wärmeabfuhr, starke Schwingungen oder Partikelemissionen – mit konfliktbeeinflussenden Attributen der Betriebsmittel abgeglichen. Ist eine Anordnung der Betriebsmittel aufgrund der durch die Änderung entstehenden Konflikte nicht möglich, muss eine Anpassung der Änderung erfolgen.

Die Ergebnisse der Auswirkungsanalyse stellen die Grundlage für die Umsetzungsplanung, in welcher die Arbeitsschritte zur Implementierung der Anpassungen beschrieben werden, dar. Auf Basis der Planung erfolgt eine finanzielle Bewertung der Änderungsalternativen durch die Berechnung von Kapitalwert und Differenzdeckungsbeiträgen (MALAK 2013, S. 70–75), bevor die Umsetzung der bevorzugten Option erfolgt. Durch die Dokumentation aller Arbeitsschritte und den damit verbundenen Kosten, Ressourcen, etc. in einem Lösungsspeicher, erfolgt eine kontinuierliche Verbesserung der Änderungsplanung (MALAK 2013, 78 f.). Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe in der Planung der technischen Änderungen wird nicht beschrieben.

Zusammenfassung des Einsatzes der Analyse von Änderungsauswirkungen in MCM-Prozessen

In der Literatur werden bereits ganzheitliche MCM-Prozesse beschrieben, welche das MCM in eine vorbereitende/proaktive, eine umsetzende/reaktive und eine nachbereitende/retrospektive Phase unterteilen. Die Prozesse zeigen, dass die Analyse von Änderungsauswirkungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten und Zielsetzungen im Rah-

men der proaktiven und reaktiven Phase eingesetzt werden kann. Des Weiteren werden diverse Methoden zur Analyse von MCs angesprochen und eingeführt.

Die Analyse in der proaktiven Phase wird zur

- Identifikation der durch eine Änderungsursache betroffenen Fabrikelemente,
- Identifikation der relevanten Stakeholder und
- Konkretisierung der Änderungsbedarfe

eingesetzt.

Die Informationen fließen anschließend in die Formulierung des Änderungsantrags ein und sind für die Entscheidung über dessen Genehmigung essentiell.

In der reaktiven Phase erfolgen Auswirkungsanalysen zur

- Identifikation von Änderungsfortpflanzungen,
- Definition der notwendigen Schritte zur Umsetzung der Änderung,
- Bewertung von Investitionskosten und
- Bewertung des Nutzens der Änderung.

Je nach Einbindung in den jeweiligen MCM-Prozess und die definierte Zielsetzung der Analyse werden diverse Methoden vorgeschlagen bzw. vorgestellt.

Diese starten mit unterschiedlichsten Informationsständen, welche von grober Kenntnis der Änderungsursache bis hin zu einer detaillierten Benennung der zu ändernden Fabrikelemente und deren Eigenschaften reichen. Ein Analyseverfahren, welches für alle Einsatzgebiete geeignet ist, ist in der Literatur zu MCM-Prozessen nicht vorzufinden.

Weitere Ansätze sind in der Literatur zur Planung von MCs zu finden. Zusätzlich bestehen alleinstehende Ansätze für die Auswirkungsanalyse. Die relevanten Methoden aus diesen beiden Bereichen werden im folgenden Abschnitt 3.2 betrachtet.

3.2 Alleinstehende Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

CISEK (2005) entwickelt eine Vorgehensweise zur kontinuierlichen Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen, wobei die Betrachtung die Bereichs- und Betriebsmittelstruktur – also die Art, Anzahl und Anordnung der Betriebsmittel – betrifft (CISEK 2005, S. 53). Der Ansatz gliedert sich hierfür in ein Monitoringmodul, ein Planungsmodul und ein Bewertungsmodul. Die Identifikation von Änderungsbedarfen erfolgt im Monitoringmodul durch die Überwachung von Kennzahlentrends hinsichtlich leistungsorientierter, nutzungsorientierter und kostenorientierter Kennzahlen. Singuläre Ereignisse als Auslöser von Änderungsbedarfen werden angesprochen, aber im Monitoringmodul nicht weiter adressiert. Eine Analyse von Änderungsauswirkungen wird nicht als Teil des Planungsvorgehens genannt, wobei eine Bewertung der Rekonfigurationsalternativen anhand einer detaillierten Betrachtung von Leistungs-, Bereitschafts- und Migrationskosten erfolgt (CISEK 2005, S. 101–119). Unsicherheiten und Unschärfe werden bei der Planung und Bewertung nicht berücksichtigt.

NOFEN (2006) entwickelt einen umfangreichen Ansatz zur regelkreisbasierten Planung von Wandlungsprozessen der modularen Fabrik. Die Identifikation von Anpassungsbedarfen erfolgt dabei durch ein Fabrikmodul- und Strukturcontrolling in Verbindung mit den acht Wandlungsbedarfsindikatoren Marktleistung, gesetzliche Auflagen, Wirtschaftlichkeit, Mitarbeiterentwicklungen, Logistikleistung, Produktqualität, technische Störungsanfälligkeit und Technologieinnovation (NOFEN 2006, S. 76). Besteht ein Wandlungsbedarf, wird dieser mittels generischer Wirkketten in direkt vom Wandel betroffene Fabrikmodulbestandteile überführt (NOFEN 2006, S. 79–91). In den Wirkketten werden Fabrikelemente berücksichtigt, die direkt an der Wertschöpfung beteiligt sind. Änderungsauswirkungen auf weitere Elemente, wie beispielsweise die Medienversorgung oder die übergeordnete IT-Landschaft, werden anschließend experten- und fachwissenbasiert analysiert. Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe erfolgt in diesem Ansatz nicht.

Ein weiteres Vorgehen zur Analyse und Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik wird von WULF (2011) beschrieben. Das Ziel dieses Vorgehens ist es, den Aufwand für die Änderung hinsichtlich Dauer und Kosten abschätzen und minimieren zu können. Zur Identifikation notwendiger Maßnahmen erfolgt ein Abgleich der Anforderungen, welche die neue Technologie bzw.

das neue Produkt an die Fabrik stellt, und den aktuellen Fähigkeiten des Produktionssystems. Bei Untererfüllungen der Anforderungen wird das Ausmaß der notwendigen Anpassungen durch ein Expertenteam bestimmt. Für alle erforderlichen Maßnahmen werden Schätzungen für Implementierungszeit und -kosten vorgenommen, wobei die Kostenstruktur nach BRIEKE (2009, S. 147) für die finanzielle Bewertung genutzt wird. Änderungsfortpflanzungen und Unsicherheiten werden nicht berücksichtigt.

RICHTER ET AL. (2014) beschreiben einen Ansatz zur Modellierung von Produktionssystemen zur Unterstützung von Restrukturierungen mit dem Ziel, direkte Auswirkungen von Änderungstreibern auf die Fabrikelemente schnell zu bestimmen. Hierfür werden relevante Änderungstreiber – aufbauend auf KLEMKE (2014) – und die Strukturelemente in einer Fabrik in einer Matrix miteinander verbunden und die Verbindungen qualitativ und textuell spezifiziert. LÜBKEMANN & NYHUIS (2016) entwickeln diesen Ansatz weiter, um eine modellbasierte Analyse der durch eine Veränderung direkt oder indirekt beeinflussten Elemente einer Fabrik inklusive der Einflussstärke zu ermöglichen. Zusätzlich zu den qualitativen Verknüpfungen aus RICHTER ET AL. (2014) wird die Definition von Kennzahlengrenzwerten für die Eigenschaften der Strukturelemente der Fabrik, welche maßgeblich durch die Veränderungstreiber beeinflusst werden und als kritisch zu betrachten sind, genannt. Dies erfolgt auf Basis eines IST-Modells der Strukturelemente. LÜBKEMANN (2016) komplettiert die Unterstützung der Methodik durch ein Zielsystem zur Bewertung von Fabrikstrukturen, einen Veränderungstreiberkatalog, morphologische Kästen zur Beschreibung der relevanten Eigenschaften von Fabrikstrukturen und Abgleichsmatrizen zur Identifikation ungünstiger Merkmalkombinationen von Fabrikstrukturen.

Der Ansatz von POHL (2014) dient der Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. Der Ansatz hat primär die Identifikation geeigneter Zeitpunkte für die Implementierung der Änderungen unter Berücksichtigung von Produkt-, Technologie- und Betriebsmittellebenszyklen zum Ziel und ist in die Phasen Identifikation des Adaptionbedarfes, Erstellung von Adaptionsszenarien und Bewertung der Adaptionsszenarien gegliedert (siehe Abbildung 3.3). Die Identifikation von Adaptionbedarf erfolgt durch die Überwachung von schleichenden Effizienzverlusten, welche sich durch die strukturelevanten Kennzahlen Liefertreue, Durchlaufzeit, Betriebsmittelauslastung, Stückkosten, Betriebsmittelverfügbarkeit und Instandhaltungskosten bemerkbar machen (POHL 2014; REINHART ET AL. 2009a,b, S. 70). Um eine prospektive Überwachung zu ermöglichen, werden die Kennzahlenverläufe mit den

relevanten Lebenszyklen kombiniert und unter Berücksichtigung von Unsicherheiten ein Korridor für den möglichen Verlauf der Kennzahlen aufgespannt. In Anlehnung an KREBS (2012) werden für verschiedene Größen unterschiedliche Modellierungsarten zur Darstellung von Unsicherheiten genutzt (POHL 2014, S. 70–73). Einmalige Ereignisse wie die Einführung neuer Produkte werden ebenso überwacht, wobei dies nicht methodisch unterstützt wird. Änderungsbedarfe werden identifiziert, wenn die betrachteten Kennzahlen definierte Grenzwerte unter- bzw. überschreiten (POHL 2014, 82 ff.). Eine Analyse von Änderungsauswirkungen wird nicht explizit genannt, wobei einerseits eine Analyse der Realisierbarkeit der Änderungen in Phase 2 als auch eine detaillierte Kostenbewertung in den Phasen 2 und 3 erfolgen. Für die Analyse der Realisierbarkeit von Änderungen der Produktionsstruktur werden Abhängigkeitsmatrizen zwischen Produkt, Technologie und Betriebsmitteln genutzt (POHL 2014, 86 ff.). Die Bewertung der Planungsalternativen erfolgt mit Hilfe eines Kostenmodells unter Berücksichtigung von Unsicherheiten wobei die Adaptionkosten (POHL 2014, S. 89) und die neuen Herstellkosten (POHL 2014, S. 96) betrachtet werden. Zur Bestimmung der unsicherheitsbehafteten Ergebnisse kommt eine Monte-Carlo-Simulation zum Einsatz.

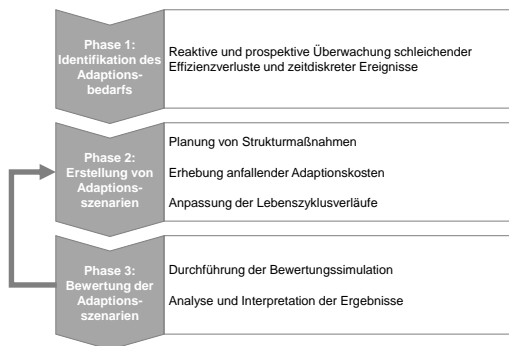


Abbildung 3.3: Vorgehensweise zur Adaption von Produktionsstrukturen nach POHL (2014, S. 62)

KERNSCHMIDT ET AL. (2014) untersuchen Änderungen in mechatronischen Produktionssystemen. Der beschriebene Ansatz unterstützt die Identifikation der betroffenen Elemente im mechatronischen System und von weiterführenden Auswirkungen in den Lebenszyklusphasen Umsetzung, Projektorganisation, Produktion, Distribution, Nutzung

und Verwertung. Die Auswirkungsanalyse wird im MCM-Prozess in die Vorbereitung und Entscheidung über Alternativen eingeordnet. Zur Identifikation betroffener Elemente des mechatronischen Systems wird eine Modellierung in SysML4Mechatronics (KERNSCHMIDT & VOGEL-HEUSER 2013) genutzt. Dabei werden die Elemente des Systems inklusive ihrer Ein- und Ausgänge (sog. Ports) und ihrer Verbindungen – untergliedert in mechanische, elektrische, Kommunikations- und Softwareschnittstellen – visualisiert sowie die Kompatibilität der Vernetzungen im geänderten System anhand der Verbindungstypen und Port-Typen geprüft. Diese Kompatibilitätsprüfung kann auf Basis der Web Ontology Language (OWL) und SPARQL Protocol And RDF Query Language durch gezielte Abfragen und definierte Regeln automatisiert erfolgen (S. FELDMANN ET AL. 2014). Die Abschätzung der Auswirkungen auf weitere Lebenszyklusphasen erfolgt expertenbasiert anhand von Checklisten, welche mögliche Auswirkungsarten abfragen. Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und Unschärfe erfolgt nicht.

KARL (2015) und KARL & REINHART (2015) beschreiben eine Methodik zur Ermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln, welche in die Schritte Darstellung der Anforderungen, Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen, Generierung von Rekonfigurationalternativen und Auswahl der besten Alternative gegliedert ist (KARL 2015, S. 77). Im zweiten Schritt wird für die direkte Identifikation der Anpassungsbedarfe ein Abgleich zwischen einem Betriebsmittelanforderungs- und einem Betriebsmitteleigenschaftsmodell genutzt, wobei die Anforderungen zur Quantifizierbarkeit und Modellierbarkeit der Einflussfaktoren auf die Betriebsmittel dienen. Wird eine geänderte Anforderung von einem Betriebsmittel nicht mehr erfüllt, führt dies zu einem Rekonfigurationsbedarf. Um einen identifizierten Anpassungsbedarf zu adressieren, werden im dritten Schritt zunächst die direkt zu adaptierenden Bauteile gewählt, bevor eine Auswirkungsanalyse zur Bestimmung von Folgeänderungen im Betriebsmittel erfolgt. Die Grundlage für die Auswirkungsanalyse ist ein DSM-basiertes Betriebsmittelstrukturmodell, in welchem mechanische, informationstechnische, elektrische, fluide, thermische, logische und funktionale Abhängigkeiten der Bauteile des Betriebsmittels dokumentiert sind. Unter Berücksichtigung der Vernetzungen werden Rekonfigurationalternativen erzeugt, bevor in einem abschließenden Schritt die strukturelle und betriebswirtschaftliche Bewertung der Alternativen erfolgt. Die kostenseitige Bewertung wird unter Modellierung von Unsicherheiten mittels einer Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, wobei die Rekonfigurationskosten aus Mitarbeiterkosten, Entwicklungskosten, Materialkosten, Maschinenkosten, Stillstandskosten und sonstigen

Kosten bestimmt werden (Karl 2015 S. 72-75).

Der Ansatz von PLEHN (2017) beschäftigt sich explizit mit der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion, wobei als Auswirkungen hierbei die verursachten Kosten in Form von Investitionen und dem Zeitaufwand für Planung und Implementierung definiert werden (PLEHN 2017, S. 13). Die Methode strebt eine schnelle, expertenbasierte Abschätzung der Änderungskosten zur Unterstützung der frühen konzeptionellen Phase des MCM an, wofür im Zuge der Analyse ebenso potenziell betroffene Fabrikelemente identifiziert werden. Als Informationsbasis wird zunächst ein graphenbasiertes Flussmodell des betrachteten Produktionssystems mit Hilfe des Metamodells von PLEHN ET AL. (2015b) erstellt (siehe Abbildung 3.4). Anschließend werden die für die Änderung relevanten Flussverbindungen des Modells durch die Expert*innen mit Wahrscheinlichkeiten für Änderungsförpflanzungen über die jeweilige Verbindung sowie mit Werten für die verursachten Kosten und Zeitaufwände im Falle einer Änderungsförpflanzung versehen. Zur Abschätzung von Kosten und Aufwand erfolgt eine Dreipunktschätzung nach PERT. Hierbei werden Angaben zu dem optimistischsten Szenario, dem pessimistischsten Szenario sowie dem wahrscheinlichsten Szenario dokumentiert, wodurch eine Beta-Wahrscheinlichkeitsverteilung definieren. Die Simulation der Änderungsauswirkungen inklusive möglicher Förpflanzungen erfolgt abschließend mittels der Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation in Verbindung mit einem Breadth-First-Search-Algorithmus. Das Ergebnis sind quantitative Wahrscheinlichkeitsverteilungen für anfallende Kosten und Zeitaufwände. Der Ansatz lässt sich in dem MCM-Prozess von KOCH (2017) dem Schritt der konzeptionellen Problemlösung zu Beginn der reaktiven Phase zuordnen (KOLTUN ET AL. 2018).

X.-L. HOANG ET AL. (2019) beschäftigen sich in ihren Arbeiten mit der Rekonfiguration von Betriebsmitteln zur Realisierung von neuen Produkteigenschaften. Das Ziel der Auswirkungsanalyse ist die Identifikation der direkt betroffenen Elemente durch die initiale Produktänderung und die anschließende Generierung von Adaptionalternativen (X. L. HOANG ET AL. 2018; X.-L. HOANG ET AL. 2017a). Die Grundlage für die Analyse ist einerseits eine MDM zur Verknüpfung von Prozess-, Produkt- und Betriebsmitteleigenschaften und andererseits ein „Variability Model“ des Betriebsmittels und dessen Komponenten (X.-L. HOANG ET AL. 2017b). Die MDM enthält sowohl qualitative Verknüpfungen zur Beschreibung von Korrelationen sowie quantitative Abhängigkeiten in Form von mathematischen Beziehungen (X.-L. HOANG & FAY 2019; X.-L. HOANG ET AL. 2018). Bei der Änderung einer Produkteigenschaft



Abbildung 3.4: Vorgehen zur Analyse von Änderungsauswirkungen nach PLEHN (2017, S. 80)

wird die jeweilige Zeile der MDM hinsichtlich der dokumentierten Abhängigkeiten analysiert. Auf Basis des Variability Models werden für die betroffenen Eigenschaften von Prozess und Betriebsmittel, welche zur Realisierung des Produkts angepasst werden können, Änderungsalternativen abgeleitet. Der Ansatz wird einerseits von MARKS ET AL. (2017) um den Einsatz von einem Multiagentensystem zur Durchführung der Analyse erweitert. Andererseits ergänzen MARKS ET AL. (2018) die ökonomische und technische/strukturelle Bewertung von Hardware- und Softwareänderungen. Die ökonomische Betrachtung der Hardware umfasst dabei die Stillstandskosten, Personalkosten und Anpassungszeit. Die technische und strukturelle Bewertung beinhaltet die Anzahl der zu ändernden Komponenten und Schnittstellen, die benötigten Werkzeuge, die Zugänglichkeit und den benötigten Kraftaufwand. Für Softwareänderungen wird auf die Möglichkeit der Auswertung vergangener Änderungen verwiesen. Der Nutzen der Anpassungen wird durch die Vergrößerung der Flexibilität des Betriebsmittels gemessen. Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und eine Einordnung in das MCM wird in diesen Ansätzen nicht thematisiert.

HERMANN ET AL. (2022) beschreiben ein Verfahren zu Identifikation und Bewertung von alternativen Produktionsänderungen bei der Herstellung medizinischer und sicherheitskritischer Produkte. Dabei wird als Änderungsauslöser die Forderung nach einer geänderten Produkteigenschaft betrachtet. Die Auswirkungs- und Fortpflanzungsanaly-

se dient der Bestimmung aller beeinflussten Produktionsschritte und der notwendigen Änderungen (HERMANN ET AL. 2019). Für die Analyse wird zunächst eine DMM zur Modellierung der Einflüsse zwischen den Produktionsschritten, dem Prüfprozess und den Produkteigenschaften erstellt (BERGS ET AL. 2020a; BERGS ET AL. 2019). Die Auswertung erfolgt anschließend zeilenweise beginnend mit der zu verändernden Produkteigenschaft (siehe Abbildung 3.5). Alle potenziellen Auswirkungen, die durch die dokumentierten Vernetzungen entstehen können, werden von eine*r Expert*in geprüft und bei Bedarf mittels Folgeänderungen kompensiert. Die DMM gibt in diesem Zuge zusätzlich Aufschluss darüber, welche Prozessänderungen zur Erreichung der neuen Produkteigenschaft möglich sind (BERGS ET AL. 2020b). Für die Berücksichtigung von Unsicherheiten in Expertenaussagen zu den Abhängigkeiten in der DMM wird auf REY ET AL. (2019) verwiesen, welche mit der Fuzzy-Theorie und der Dempster-Shafer-Theorie arbeiten. Die Bewertung der entstehenden Änderungsalternativen erfolgt im Anschluss hinsichtlich den entstehenden Stückkosten – Summe der Produktionskosten, Materialkosten und Prüfkosten (KLOCKE ET AL. 2018) – im geänderten System (HERMANN ET AL. 2019).

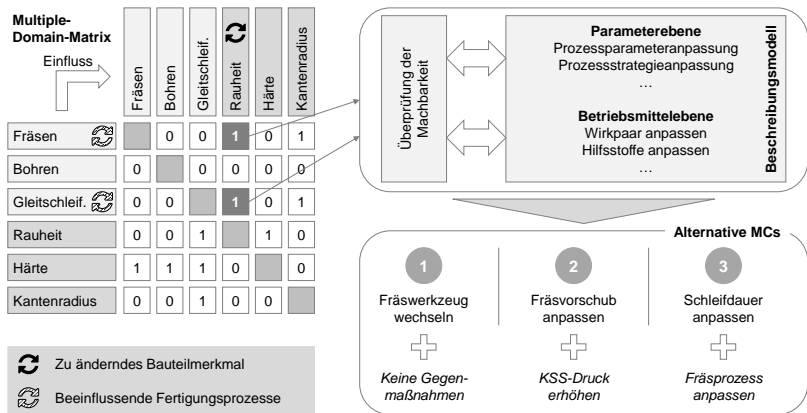


Abbildung 3.5: Analyse von Änderungsauswirkungen mittels Domain-Mapping-Matrix (BERGS ET AL. 2019)

SIPPL ET AL. (2022b) fokussieren sich auf die frühzeitige Identifikation von Stakeholdern im MCM. Die Methode basiert auf der Erstellung eines „Change Responsibility Profile (CRP)“ für die möglichen Stakeholder einer Änderung. Das CRP stellt einen

morphologischen Kasten dar, welcher die relevanten Dimensionen und Spezifizierungen für die Beschreibung der Rollen der Mitarbeitenden des Unternehmens beinhaltet. Zur Analyse einer Änderung wird diese mit Hilfe des morphologischen Kasten charakterisiert. Anschließend erfolgt ein Abgleich der Änderung mit den Rollen bzw. Profilen der möglichen Stakeholder. Die Ähnlichkeit der Profile eines/einer Mitarbeitenden und einer Änderung wird als Schlüsselindikator für die Relevanz des Stakeholders verwendet. Eine Berücksichtigung von Unsicherheiten und eine Einordnung in das MCM wird von SIPPL ET AL. (2022b) nicht vorgenommen.

Neueste Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion befassen sich mit datenbasierten Vorgehensweisen, wie sie in den letzten Jahren auch im Bereich der Produktentwicklung⁴ verfolgt wurden (SCHUH ET AL. 2021; SIPPL & REINHART 2021). Im MCM wurden aktuell konkretisierte Vorgehensweisen, die das Ziel der Stakeholder Identifikation für Produktänderungen oder technische Änderungen adressieren, beschrieben (SIPPL ET AL. 2021). Hierfür kommen Methoden der Clustering und des Natural Language Processing zum Einsatz, um vergangene Änderungen, die eine Ähnlichkeit zu der analysierten Änderung aufweisen, zu identifizieren (SIPPL ET AL. 2022c). Mittels Process Mining werden die Abläufe von Änderungsprozessen und somit die einbezogenen Personen bzw. Unternehmensbereiche ausgewertet (SIPPL ET AL. 2022a). Für die Planung der neuen Änderungen werden Personen, die in der Vergangenheit an ähnlichen Veränderungen beteiligt waren, als relevante Stakeholder angesehen. Die Identifikation der Stakeholder wird als wichtiger Schritt vor der Planung einer Änderung genannt (SIPPL ET AL. 2022a) und kann somit am Übergang zwischen der proaktiven und der reaktiven Phase des MCM eingeordnet werden.

Zusammenfassung der alleinstehenden Ansätze zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion wurden unterschiedlichste Ansätze präsentiert. Im Gegensatz zu den generischen Prozessen des MCM (siehe Abschnitt 3.1) wird in einigen Ansätzen der spezifische Anwendungsbereich stark fokussiert. Dies erfolgt beispielsweise anhand der Änderungsursache bzw. dem Änderungsobjekt – z. B. Produktänderung (X.-L. HOANG ET AL. 2019), Technologieänderung

⁴ z. B. M. WICKEL (2017), LEE & HONG (2017) oder KATTNER (2020)

(WULF 2011), Betriebsmittelrekonfiguration (KARL 2015) etc. – oder auch der Branche – z. B. Medizintechnik (HERMANN ET AL. 2019). Je nach Betrachtungsbereich unterscheiden sich die Zielsetzungen sowie die genutzten Modelle und Methoden der Vorgehensweisen. Eine geeignete Integration der Analyseverfahren in das MCM wird nicht vorgenommen.

3.3 Resultierender Handlungsbedarf und Forschungshypothese

Zur Beurteilung des Stands der Wissenschaft und Technik hinsichtlich der in Kapitel 1 beschriebenen Zielsetzung und zur weiteren Spezifizierung des Forschungsziels wird die relevante Literatur im Folgenden hinsichtlich den Herausforderungen bei der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion aus Abschnitt 2.7 bewertet. Zur Visualisierung der Bewertung werden sogenannte Harvey-Balls genutzt, welche übersichtlich aufzeigen, inwiefern die einzelnen Ansätze die Herausforderungen adressieren. Je vollständiger die Kreise gefüllt sind, desto höher ist der Erfüllungsgrad einer Herausforderung (siehe Abbildung 3.6). Die Bewertung des Stands der Wissenschaft und Technik ist in Abbildung 3.7 zu finden.

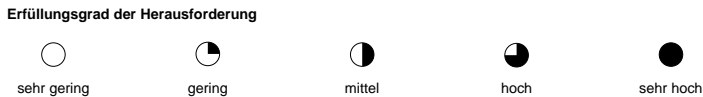


Abbildung 3.6: Harvey-Balls-Skala in Anlehnung an KETT & SCHEWE (2010, S. 129)

Vielfältigkeit von Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen

Zunächst ist festzustellen, dass in der bestehenden Literatur zwar diverse Arten von Änderungsauswirkungen und -fortpflanzung in der Produktion analysiert werden, die Analyseverfahren jedoch jeweils nur die Untersuchung einzelner dieser Größen ermöglichen. Ein starker Fokus ist durchgehend bei der Betrachtung von Änderungskosten zu erkennen, wobei hierbei primär zur Durchführung der Änderung notwendige Kosten bewertet werden. Insbesondere die Analyse von Änderungen von Eigenschaften des Produktionssystems wie beispielsweise Produktionskennzahlen (z. B. Durchlaufzeiten, ergonomische Bewertungen) wird bisher nur von wenigen Ansätzen wie MALAK (2013) behandelt. Um eine universell anwendbare Methodik bereitzustellen, ist es im Weiteren

notwendig, die Analyse jeder Art von Änderungsauswirkungen in einem gesamtheitlichen Ansatz zu betrachten, wobei für jede Zielgröße die geeigneten Modelle und Analysemethoden bereitgehalten werden müssen.

Komplexität von Produktionssystemen, Unsicherheit und Unschärfe

Vor allem im Bezug auf die Modellierung von Produktionssystemen zur Komplexitätsbeherrschung kann hierfür auf dem Stand der Wissenschaft und Technik aufgebaut werden. Wenngleich die Modellierungstechniken auf die einzelnen Zielsetzungen der Ansätze ausgerichtet sind und somit keine ganzheitliche Analyse ermöglichen, sind bestimmte Modelltypen in mehreren Analyseverfahren vorzufinden. Die Modellierung der Produktion als ein System aus Produktionselementen und Vernetzungen (Flussverbindungen und logischen Verknüpfungen) dient in der Regel als Basis für die Vernetzungsanalyse und Identifikation von durch einen MC betroffenen Elementen. Dabei erfolgt die Dokumentation der Vernetzungen häufig mit Hilfe von DSMs, DMMs und MDMs, während für die Visualisierung graphenbasierte Ansätze zum Einsatz kommen. Selten betrachtete Aspekte sind die Analyse des Produktionslayouts und die Modellierung von Produktionskennzahlen. Die Modellierung von Unsicherheit und Unschärfe wird in einigen Ansätzen aufgegriffen, wobei in diesen vorwiegend die Kosten- und Aufwandschätzung von Änderungen unter Unsicherheit vorgenommen wird. Eine Integration von Unsicherheiten in die Modelle zur Analyse von weiteren Änderungsauswirkungen wie beispielsweise der Identifikation der sich verändernden Produktionskennzahlen ist aktuell noch weiter zu spezifizieren.

Wiederkehrender Änderungsbedarf

Die bestehenden Modellierungsmethoden können bereits zu einem großen Teil mit einem wiederkehrenden Änderungsbedarf umgehen. Da der Fokus in der Regel auf der Dokumentation des IST-Zustands des Produktionssystems liegt, werden kaum änderungsspezifische Informationen modelliert. Vor allem die Modelle zur Dokumentation von Vernetzungen im Produktionssystem können bei weiteren Änderungen weiterhin für die Auswirkungsanalyse genutzt werden und den Analyseprozess verkürzen.

Fallspezifische Informationsbedarfe, fallspezifische Rahmenbedingungen, individueller MCM-Prozess

Die Herausforderungen, die derzeit von keinem Ansatz adressiert werden, beziehen sich auf die Adaptierbarkeit der Modellierungen und der Analysemethoden an die spezifischen Informationsbedarfe und Rahmenbedingungen jedes Anwendungsfalls. Diese

sind jedoch besonders für die breite Anwendung und die Einbindung eines Vorgehens in die individuellen und verschiedenen MCM-Prozesse essentiell. Die bestehende Literatur beschreibt zwar detaillierte Methoden mit festgelegten Eingangs- und Ausgangsinformationen bzw. -dokumenten für einzelne Zielsetzungen. Sollen andere Arten von Änderungsauswirkungen als vorgesehen analysiert werden, muss jedoch auf andere Methoden zurückgegriffen werden. Auch die Anpassung der benötigten Eingangsinformationen und Modelle auf die jeweiligen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Häufigkeit von Änderungsbedarfen, die Verfügbarkeit und Qualität von Expertenwissen, die verfügbare Zeit für die Analyse oder die Komplexität des betrachteten Produktionssystems, ist kein Bestandteil bestehender Arbeiten.

Handlungsbedarf

Der übergeordnete Handlungsbedarf besteht dementsprechend in der Erarbeitung eines Vorgehens, welches an die individuellen Informationsbedarfe und Rahmenbedingungen angepasst und in einen unternehmensspezifischen MCM-Prozess flexibel eingebunden werden kann. Dies bedeutet ebenso, dass nicht nur einzelne Zielsetzungen betrachtet werden können, sondern die Gesamtheit der Vielfältigkeit an Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen – von Änderungsursachen bis Änderungskosten – analysierbar sein muss, was eine Verknüpfung unterschiedlicher Methoden benötigt. Dabei gilt es, Ansätze zum Umgang mit Unsicherheiten und Unschärfe zu integrieren. Die gewählten Modellierungsmethoden müssen eine Wiederverwendbarkeit bei wiederkehrenden Änderungen ermöglichen, wofür eine möglichst änderungsunabhängige Modellierung für alle Zielsetzungen notwendig ist.

Forschungshypothese

Infolgedessen soll ein individualisierbarer Analyseprozess gestaltet werden. Das damit verbundene Themenfeld kann unter dem Begriff des Process Tailoring (siehe Abschnitt 2.6) zusammengefasst werden. Eine Modularisierung, deren Vorteile sich wie in Tabelle 3.1 dargelegt auf die wiederkehrende Analyse von Änderungsauswirkungen übertragen lassen, dient als Grundlage für die individuelle Prozessgestaltung.

Im Weiteren wird daher von der folgenden Forschungshypothese ausgegangen:

Die Modularisierung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion ermöglicht die individuelle Konfiguration von effizienten und bedarfsorientierten Vorgehensweisen im Sinne des Process Tailoring.

Tabelle 3.1: Vorteile der (Prozess-)Modularisierung für die Analyse von Änderungsauswirkungen in Anlehnung an GÖPFERT (1998, S. 151–157) und GRUNWALD (2002, S. 73)

Vorteil	Beschreibung
Abgrenzbarkeit	Selbstständige Bearbeitung einzelner Analysebausteine durch die jeweiligen Stakeholder/Abteilungen; selektive Nutzung der Analysemodule in unterschiedlichen Prozessschritten des MCM
Standardisierbarkeit	Etablierung wiederverwendbarer, allgemeiner Standardprozesse; Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit wiederkehrender (zyklischer) Analysen
Wiederverwendung	Kontinuierliche Verbesserung der Analysequalität und -geschwindigkeit aufgrund vorhandener Prozesse und Erfahrungen durch den wiederkehrenden, zyklischen Einsatz
Kombinierbarkeit	Flexible, schnelle Konfiguration von fallspezifischen und unternehmensindividuellen Gesamtprozessen
Erweiterbarkeit	Erweiterung der Analyse durch Hinzufügen von modularen Analysebausteinen
Kontrollierbarkeit	Erfolgskontrolle der Analyseschritte durch definierte Zielgrößen/Ergebnisse je Modul
Hierarchisierung	Komplexitätsreduktion durch die geeignete Strukturierung und Aufgliederung des Gesamtumfangs der Auswirkungsanalyse
Prozessstabilität	Veränderungen im Analyseverfahren bleiben auf einzelne, modulare Teilprozesse begrenzt

Der Modularisierungsprozess nach GEBHART ET AL. (2016, S. 124) wird als geeigneter Orientierungsrahmen für die modulare Gestaltung der Auswirkungsanalyse angesehen (siehe Abbildung 2.10). Für den konkreten Aufbau eines Prozessmoduls bieten die (Geschäfts-)Prozessbausteine bzw. -module (siehe Abbildung 2.11) von MURR (1999, S. 49) und GRUNWALD (2002, S. 75) eine zielführende und anpassbare Struktur. Um den damit verbundenen Forschungsbedarf zunächst weiter zu spezifizieren, werden in Kapitel 4 die zu beantwortenden Forschungsfragen sowie die Anforderungen an die Methodik detailliert. Anschließend wird zunächst die Modularisierung der Auswirkungsanalyse in Kapitel 5 beschrieben, bevor die darauf basierende Methode zur individuellen Gestaltung der Auswirkungsanalyse in Kapitel 6 vorgestellt wird.

4 Forschungsfragen und resultierende Anforderungen

Auf Basis der Analyse des Stands der Wissenschaft und Technik bezüglich den Herausforderungen bei der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion und dem daraus resultierenden Handlungsbedarf wurden eine übergeordnete Zielsetzung sowie drei leitende Forschungsfragen abgeleitet. Diese basieren auf der Forschungshypothese aus Abschnitt 3.3.

Die übergeordnete Zielsetzung der Arbeit lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Ermöglichung einer effizienten und bedarfsorientierten Analyse – Identifikation und Bewertung – von Änderungsauswirkungen in der Produktion mittels einer Modularisierung des Analysevorgehens zur fallspezifischen Gestaltung der Auswirkungsanalyse¹

Die drei Forschungsfragen werden im folgenden Abschnitt 4.1 detailliert beschrieben, bevor in Abschnitt 4.2 die daraus resultierenden Anforderungen an die Lösungsentwicklung definiert werden.

4.1 Detaillierung der Forschungsfragen

FF#1 In welche strukturierten Module muss die Auswirkungsanalyse unterteilt werden, um die fallspezifischen Informationsbedarfe ihrer möglichen Anwendungsfälle erfüllen zu können?

¹ Wie in Abschnitt 2.3 definiert, bezeichnet die Analyse von Änderungsauswirkungen dabei *die Gesamtheit der Aktivitäten zur Bestimmung der erforderlichen Informationen über die Fortpflanzungen und Auswirkungen einer Änderung, um die anschließenden Planungsaktivitäten innerhalb des unternehmensindividuellen MCM-Prozesses erfolgreich durchführen zu können. Dies kann unter anderem die Identifikation von Änderungsbedarfen, betroffenen Fabrikelementen und notwendigen Änderungen sowie die Bewertung der Änderungsdauer, der Änderungskosten und der Auswirkungen auf Produktionskennzahlen beinhalten.* Die untersuchten Änderungen umfassen alle Rekonfigurationen, Änderungen, Addition, Substitution oder Entfernung der räumlichen Anordnung, Beziehungen und Eigenschaften von Betriebsmitteln, Raum- und Gebäudetechnik, Organisation und Personal (siehe Abschnitt 2.1.2). Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf MCs, die eine ablaufforientierte Anpassung des Produktionssystems zum Ziel haben.

Im Sinne der Modularisierung gilt es zunächst, durch die Dekomposition und die Analyse der Prozesse und der notwendigen Aktivitäten geeignete Module für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion festzulegen. Dabei steht die Ermöglichung einer Anpassung des Analysevorgehens an die fallspezifischen Informationsbedarfe sowie Rahmenbedingungen im Vordergrund. Die Detaillierungsebene sollte dabei ausreichend detailliert aber nicht zu granular gewählt werden, um die notwendige Flexibilität zu garantieren ohne unnötige Komplexität zu schaffen. Im Rahmen dieser Forschungsfrage soll zudem die Struktur der Module – in Anlehnung an GRUNWALD (2002) und REINHART & GRUNWALD (2001) – definiert werden, bevor in FF#2 eine detailliertere Betrachtung der Inhalte der einzelnen Module erfolgt.

FF#2 Welche Modellierungs- und Analysemethoden sind für die einzelnen Module im Kontext der Produktion geeignet?

Sobald die einzelnen Module feststehen, sollen die Elemente der Prozessmodule (Methoden, Werkzeuge, Ressourcen, etc.) ausgearbeitet werden. Im Kontext der Analyse von Änderungsauswirkungen fokussiert sich diese Forschungsfrage vor allem auf die zu nutzenden Analyse- und Modellierungsmethoden. Diese müssen insbesondere die Herausforderungen aus Abschnitt 2.7 adressieren. Dementsprechend soll für jedes Modul eine Recherche sowie ein Vergleich geeigneter Verfahren durchgeführt werden. Die ausgewählten Methoden werden abschließend in spezifische Vorgehensweisen für die Ausführung eines Prozessmoduls integriert. FF#2 schließt somit die Modularisierung der Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion ab.

FF#3 Wie kann eine fallspezifische Vorgehensweise für die Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion erstellt werden?

Zur Nutzung des modularen Analyseprozesses im Sinne des Process Tailoring muss eine Logik sowie eine Vorgehensweise zur Prozesskonfiguration bereitgestellt werden. Diese umschließt dementsprechend die Ergebnisse der ersten beiden Forschungsfragen und macht diese für eine*n Anwendenden nutzbar. Ein*e Nutzer*in sollte auf Basis seiner/ihrer Kenntnis des Anwendungsbereichs die Individualisierung des Prozesses mit vertretbarem Aufwand vornehmen können. Somit gilt es, eine Methodik bereitzustellen, welche die Informationen über die fallspezifischen Rahmenbedingungen mit den definierten Modulen geeignet verknüpft.

4.2 Anforderungen an die Methodik

Das übergeordnete Ziel der Arbeit ist die Ermöglichung einer effizienten und bedarfsorientierten Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion. Die Effizienz der Lösung soll durch die Auswahl und Entwicklung geeigneter Modellierungs- und Analysemethoden sichergestellt werden. Eine bedarfsorientierte Auswirkungsanalyse soll durch eine Modularisierung des Analysevorgehens als Basis für dessen fallspezifische Gestaltung erreicht werden.

Um beurteilen zu können, inwiefern die Ergebnisse dazu beitragen, dieses Ziel zu erreichen, ist die Formulierung von Erfolgskriterien notwendig (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 26f.). Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit konkrete Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung gestellt. Diese dienen abschließend ebenso zur Ableitung von Limitationen der Ergebnisse.

Um die gesetzte Zielstellung zu erreichen und die bestehenden Herausforderungen aus Abschnitt 2.7 zu adressieren, muss die neue Methodik sowohl allgemeine, formale Anforderungen als auch spezifische, inhaltliche Anforderungen erfüllen (siehe Abbildung 4.1).

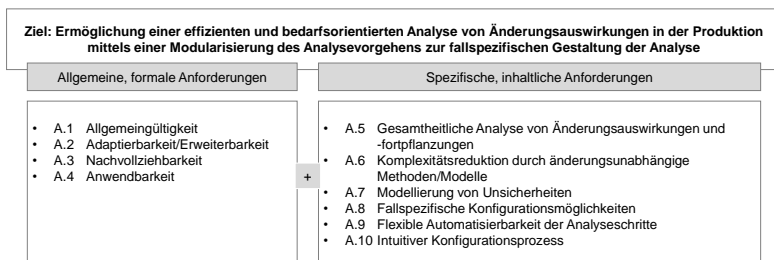


Abbildung 4.1: Allgemeine und spezifische Anforderungen an den Lösungsansatz

4.2.1 Allgemeine, formale Anforderungen

A 1 Allgemeingültigkeit: In Kapitel 1 wurde bereits die Eingrenzung des Betrachtungsbereichs auf zyklische Änderungen in der Serien- und Massenproduktion vorgenommen. Des Weiteren wurde die Analyse von Änderungsauswirkungen

beginnend mit der Untersuchung des Einflusses von Änderungsursachen auf die Produktionssystemebene „Fabrik“ und deren Elemente als Fokus festgelegt. Innerhalb dieses Rahmens müssen die entwickelten Lösungen für alle Anwendungsfälle Gültigkeit besitzen.

- A 2 Adaptierbarkeit/Erweiterbarkeit:** Durch den grundlegenden Ansatz der Modularisierung ist bereits ein erster Schwerpunkt auf die Anpassung der Ergebnisse auf unterschiedliche Rahmenbedingungen gesetzt. Dennoch muss berücksichtigt werden, dass in Zukunft ggf. auch noch weitere Zielsetzungen oder (unternehmensspezifische) Methoden identifiziert werden können. Die Ergebnisse müssen dementsprechend in einer Form gestaltet werden, die eine einfache Erweiterbarkeit – beispielsweise durch die Definition von weiteren Modulen – zulässt.
- A 3 Nachvollziehbarkeit:** Sowohl die Logik zur Auswahl der Module und der Gestaltung des individuellen Analyseverfahrens als auch die Ergebnisse der Analyse sollen für die Anwendenden nachvollziehbar sein. Hierfür sind insbesondere die Schnittstellen und Abhängigkeiten der Methodenschritte und der Analysemodule klar zu beschreiben und aufeinander abzustimmen.
- A 4 Anwendbarkeit:** Die Anwendung der Ergebnisse soll in einem industriellen Kontext erfolgen. Um in diesem Umfeld eine Durchführung mit vertretbarem Aufwand zu ermöglichen, sind neben einer durchgängigen und verständlichen Beschreibung der Methodenschritte Hilfsmittel wie Checklisten, Leitfragen oder ähnliches zu erstellen.

4.2.2 Spezifische, inhaltliche Anforderungen

- A 5 Gesamtheitliche Analyse von Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen:** Es ist die Zielsetzung der Arbeit, eine im Betrachtungsraum universell anwendbare Analyse von Änderungsauswirkungen zur Verfügung zu erstellen. Hierfür ist es notwendig, mit den Ergebnissen bei Bedarf auch die Gesamtheit aller möglichen Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen analysieren zu können.
- A 6 Komplexitätsreduktion durch änderungsunabhängige Methoden/Modelle:** Zur Erleichterung der einzelnen Analyseschritte sind je nach Zielsetzung und Rah-

menbedingungen geeignete Methoden und Modelle auszuwählen. Um den Aufwand bei einer regelmäßigen Durchführung der Auswirkungsanalyse aufgrund des zyklischen Charakters von Änderungen zu reduzieren, ist dabei besonders bei der Modellierung auf die änderungsunabhängige und somit wiederverwendbare Gestaltung der Lösung zu achten. Es soll ein möglichst hoher Umfang an Tätigkeiten nur einmalig pro Anwendungsbereich (und nicht bei jeder Durchführung der Analyse) ausgeführt werden müssen.

A 7 Modellierung von Unsicherheiten: Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben, ist für die Analyse von Änderungsauswirkungen die Aufnahme von Expertenwissen und die Betrachtung zukünftiger Zustände – häufig bereits in einer frühen Planungsphase – notwendig. Die dabei auftretenden Planungsunsicherheiten müssen geeignet abgefragt und modelliert werden, um ein vollständiges Bild der Änderungsauswirkungen bereitzustellen.

A 8 Fallspezifische Konfigurationsmöglichkeiten: Die Lösung muss durch die Modularisierung eine fallspezifische Konfiguration der Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion ermöglichen. Dies umfasst die Anpassung sowohl an einen individuellen Informationsbedarf bzw. eine individuelle Zielsetzung als auch an unterschiedliche Rahmenbedingungen wie beispielsweise die verfügbare Zeit zur Durchführung der Analyse, die Komplexität des Produktionssystems oder die Häufigkeit der Änderungen.

A 9 Flexible Automatisierbarkeit der Analyseschritte: Vor dem Hintergrund von zyklischen Änderungen und somit regelmäßigen Analysen sollten alle Methoden und Modellierungen einen möglichst hohen Automatisierungsgrad erlauben, um den Analyseaufwand bei mehrfacher, wiederkehrender Durchführung zu minimieren. Da eine Automatisierung jedoch in der Regel mit einem erhöhten Modellierungsaufwand einhergeht, sollte der Automatisierungsgrad – insbesondere in Abhängigkeit von der Frequenz der Änderungen – anpassbar sein.

A 10 Intuitiver Konfigurationsprozess: Die Konfiguration der Analyseverfahren muss von den Anwendenden intuitiv durchführbar sein. Es gilt, einen Leitfaden bzw. eine Methode für den Konfigurationsprozess zu beschreiben.

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Das Process Tailoring der Analyse von Änderungsauswirkungen mit dem Ziel, ein effizientes und bedarfsorientiertes Analyseverfahren zu gewährleisten, soll durch eine Prozessmodularisierung ermöglicht werden. Hierfür wurden Prozessmodule entwickelt, die die notwendigen Tätigkeiten zur Bestimmung von Änderungsbedarfen und Änderungsmaßnahmen sowie zur Bewertung von Änderungsauswirkungen in der Produktion in geeignete Bausteine, wie z. B. die Bestimmung von Änderungskosten, gliedern. Die Module können nach einer klaren Methodik zu einem fallspezifischen Vorgehen, welches von den Anwendenden für regelmäßige Änderungsanalysen in ihrem individuellen Kontext genutzt werden kann, konfiguriert und verknüpft werden.

In diesem Kapitel wird zunächst die modulare Gestaltung mit allen Modulen – im Weiteren auch als Analysebausteine/-module bezeichnet – vorgestellt, bevor in Kapitel 6 das Vorgehen zur Erstellung einer individuellen Auswirkungsanalyse beschrieben wird. Das Zusammenspiel der Ergebnisse der folgenden Kapitel ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

In Abschnitt 5.1 werden die ersten Schritte der Modularisierung bis zur Modulbildung vorgestellt. Hierfür wird zunächst die Detaillierungsebene zur Zergliederung des Analyseprozesses definiert, bevor die notwendigen Module anhand geeigneter Gruppierungen identifiziert werden. Zur Überführung der Analyse von Änderungsauswirkungen in die modularisierte Struktur erfolgt die Festlegung des Aufbaus der Analysemodule in Abschnitt 5.2. Die Abschnitte 5.1 und 5.2 behandeln somit die erste Forschungsfrage (FF#1) der vorliegenden Arbeit. Die ausführliche Herleitung und Beschreibung der Modulhalte zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage (FF#2) erfolgt anschließend in Abschnitt 5.3. Die benötigte Unterstützung zur Auswahl, Konfiguration und sequenziellen Verknüpfung der Analysebausteine zu einem individuellen Prozess wird in Kapitel 6 in Form einer Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion erläutert (FF#3).

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

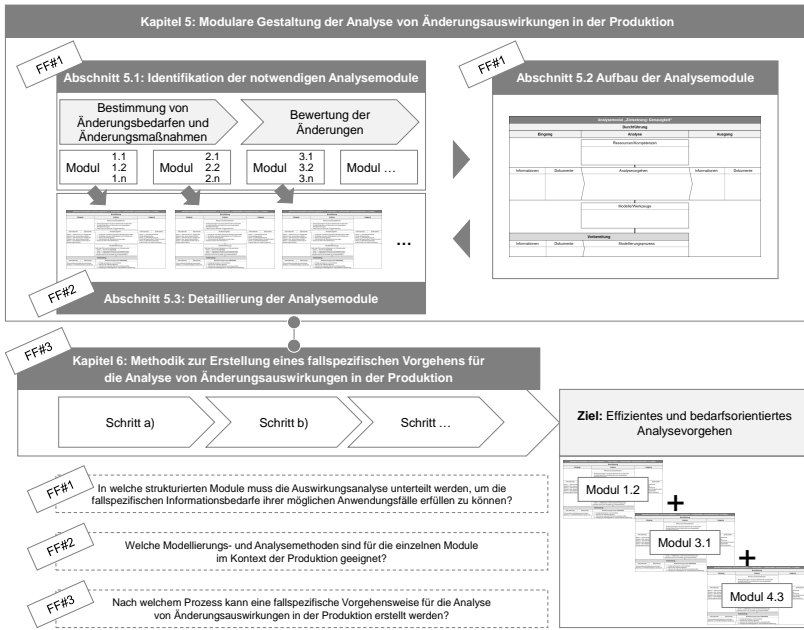


Abbildung 5.1: Kapitelstruktur und -zusammenhänge zur Modularisierung der Analyse von Änderungsauswirkungen

5.1 Identifikation der notwendigen Analysemodule

Basierend auf dem Stand der Technik wurde die grundsätzliche Struktur der Analyse von Änderungsauswirkungen analysiert. Zur Spezifikation der Vorgehensweisen wurden vier Detaillierungsebenen identifiziert (siehe Abbildung 5.2).

Detaillierungsebene	
Zielsetzung	Die Informationen, die mit der Auswirkungsanalyse bestimmt werden sollen.
Genauigkeit	Die Ergebnisgenauigkeit, in welcher die verfolgte Zielsetzung erreicht werden soll.
Methoden/ Modelle	Die Methoden, die zur Analyse genutzt werden, und die unterstützenden Modelle.
Analyseschritte	Die einzelnen Tätigkeiten, die für die Analyse schrittweise durchgeführt werden.

Abbildung 5.2: Detaillierungsebenen der Analyse von Änderungsauswirkungen

Die einzelnen Ansätze lassen sich zunächst bzgl. ihrer übergeordneten **Zielsetzung** wie beispielsweise der Kostenbewertung oder der Bestimmung von betroffenen Fabrikelementen unterscheiden. Die angestrebten Ergebnisse können wiederum mit verschiedener **Genauigkeit** ermittelt werden. So zielt das Vorgehen von PLEHN (2017) z. B. auf die Ermittlung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung von Änderungskosten unter Unsicherheit ab, während RÖSSING (2007) eindeutige Werte von Expert*innen schätzen lässt (siehe Abbildung 5.3). Je nach Spezifikation von Zielsetzung und Genauigkeit kommen geeignete **Methoden und Modelle** zum Einsatz, für deren Durchführung bzw. Nutzung wiederum mehrere **Analyseschritte** notwendig sind. Mit dem Ziel, eine Prozessindividualisierung für die Anwendenden hinsichtlich ihrer fallspezifischen Informationsbedarfe sowie Rahmenbedingungen zu erreichen, sollen die Zergliederung des Prozesses und die darauffolgende Modulbildung auf den Detaillierungsebenen Zielsetzung und Genauigkeit erfolgen (siehe Abbildung 5.3). Die Methoden, Modelle und Analyseschritte bilden unter anderem die Inhalte der Module ab (siehe Abschnitt 5.2).

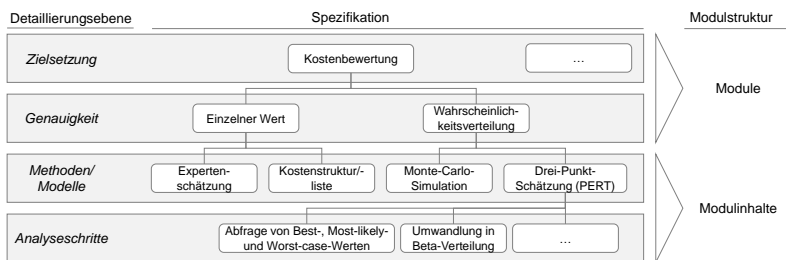


Abbildung 5.3: Beispiele für die Detaillierungsebenen der Analyse von Änderungsauswirkungen und Festlegung der Modulstruktur

Zur Untergliederung der Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion auf den Detaillierungsebenen **Zielsetzung** und **Genauigkeit** wurden die möglichen Ausprägungen dieser beiden Ebenen auf Basis von Literaturrecherchen, industriellen Fallstudien und Experteninterviews bestimmt (siehe Anhang A.3). Als eigenständige und kombinierbare **Zielsetzungen** wurden die folgenden sechs Aspekte der Auswirkungen einer Änderung identifiziert:

- Zielsetzung 1: *Durch eine Änderungsursache **betreffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe***: Eine Veränderung eines Rezeptors der Produktion kann als Änderungsursache einen Einfluss auf unterschiedliche Fabrikobjekte ausüben

und Änderungsbedarfe hervorrufen. Bei einer Veränderung eines Rezeptors gilt es, die relevanten Fabrikobjekte zu bestimmen und festzustellen, ob an diesen ein Änderungsbedarf besteht. Hierdurch werden indirekt auch die relevanten Stakeholder bestimmt, die für die betroffenen Elemente verantwortlich sind¹.

- Zielsetzung 2: *Notwendige Änderungsmaßnahmen in der Produktion*: Um einem Änderungsbedarf zu begegnen, müssen konkrete Änderungsmaßnahmen identifiziert werden.
- Zielsetzung 3: *Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe durch Änderungsfortpflanzungen*: Initiale Änderungsmaßnahmen, welche direkt an den Änderungsbedarf gebunden sind, können aufgrund der hohen Vernetzung in Produktionssystemen zu einer Änderungsfortpflanzung führen, d. h. weitere Fabrikobjekte beeinflussen und dementsprechend weitere Änderungsbedarfe hervorrufen. Es gilt, die Einflüsse und Bedarfe aufgrund von Änderungsfortpflanzungen zu identifizieren, um eine ganzheitliche Betrachtung der Änderungsauswirkungen zu ermöglichen und bei Bedarf weitere relevante Stakeholder in den Änderungsprozess einzubeziehen.
- Zielsetzung 4: *Einfluss der Änderung/en auf Produktionskennzahlen*: MCs haben einen direkten Einfluss auf die Leistung und Eigenschaften von Produktionssystemen, welche durch Produktionskennzahlen, wie z. B. die Kosten pro Einheit oder die Termintreue, spezifiziert werden. Die Bestimmung der Änderungsauswirkungen auf die Produktionskennzahlen dient als Grundlage sowohl für die Nutzenbewertung der Änderung als auch für die Identifikation von Risiken der Zielverfehlung durch das geänderte Fabriksystem.
- Zielsetzung 5: *Änderungskosten und Änderungsaufwand*: Für jede Änderung müssen ein bestimmtes Budget sowie Personalressourcen – welche gleichzeitig einen Kostenfaktor darstellen – für Analyse, Planung, Durchführung und Nachbereitung sowie für Investitionen eingeplant werden. Es gilt, diese frühzeitig zu bestimmen, um unerwartete Kosten zu vermeiden. Grundsätzlich lässt sich

¹ Vor diesem Hintergrund wurde die Identifikation von Stakeholdern im Rahmen dieser Arbeit nicht als individuelles Analysemodul betrachtet, sondern als Bestandteil der Identifikation von betroffenen Elementen und Änderungsfortpflanzungen angesehen. Durch die modulare Struktur wird es jedoch ermöglicht, die Methodik in Zukunft bei Bedarf um die Analyse von Stakeholdern, welche in der aktuellen Forschung von SIPPL ET AL. (2022a) verstärkt betrachtet wird, als eigenständiges Modul zu erweitern.

diese Zielsetzung in die Bereiche Änderungsaufwände (Personalstunden), Kosten aufgrund von Änderungsaufwänden (Personalkosten) und Investitionskosten unterteilen.

- Zielsetzung 6: **Umsetzungsdauer der Änderung/en**: Im Rahmen des MCM ist für die Planung und Umsetzung einer Änderung eine Zeit- und Ressourcenplanung notwendig. Hierfür ist neben den vorher genannten Personalaufwänden auch die Umsetzungsdauer zu bestimmen.

Für jede **Zielsetzung** wurden des Weiteren die folgenden möglichen **Genauigkeiten** zur Ermittlung der Ergebnisse identifiziert. Diese werden anhand des jeweils zu erreichenden Analyseergebnisses bzw. der zum Abschluss der Analyse vorliegenden Information definiert:

- **Durch eine Änderungsursache betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe**:
 - **Potenziell betroffen**: Nicht betroffene Fabrikobjekte sind bekannt. Fabrikobjekte, welche eventuell von der Änderungsursache betroffen sind und einem Änderungsbedarf unterliegen, sind ohne genauere Spezifizierung bestimmt. Ob ein Änderungsbedarf besteht, muss für diese Fabrikobjekte durch Expert*innen abschließend beurteilt werden.
 - **Potenziell betroffen mit Zusatzinformation** (z. B. *Wahrscheinlichkeit, Stärke des Einflusses oder ähnliches*): Nicht betroffene Fabrikobjekte sind bekannt. Fabrikobjekte, welche eventuell von der Änderungsursache betroffen sind und einem Änderungsbedarf unterliegen, sind mit einer zusätzlichen Information wie beispielsweise einer Wahrscheinlichkeit oder einer Einflussstärke bestimmt. Ob ein Änderungsbedarf besteht, muss für diese Fabrikobjekte durch Expert*innen abschließend beurteilt werden.
 - **Änderungsbedarf**: Die betroffenen Fabrikobjekte und der zugehörige Änderungsbedarf sind bekannt und müssen nicht weiter überprüft oder spezifiziert werden.
- **Notwendige Änderungsmaßnahmen in der Produktion**: Die einzelnen Änderungsmaßnahmen, welche den Inhalt eines Manufacturing Change darstellen, können lediglich entweder festgelegt oder nicht festgelegt werden. Dabei ist die Unterscheidung zu treffen, ob *mehrere Alternativen* oder nur eine *präferierte*

Option für die weitere Analyse ausgewählt werden sollen. Es besteht zudem eine enge Verknüpfung zur Analyse von Änderungsfortpflanzungen.

- ***Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe durch Änderungsfortpflanzungen:***
 - *Potenziell betroffen:* Nicht betroffene Fabrikobjekte sind bekannt. Fabrikobjekte, welche eventuell von Änderungsfortpflanzungen betroffen sind und einem Änderungsbedarf unterliegen, sind ohne genauere Spezifizierung bestimmt. Ob ein Änderungsbedarf besteht, muss für diese Fabrikobjekte durch Expert*innen abschließend beurteilt werden.
 - *Potenziell betroffen mit Zusatzinformation (z. B. Wahrscheinlichkeit, Stärke des Einflusses oder ähnliches):* Nicht betroffene Fabrikobjekte sind bekannt. Fabrikobjekte, welche eventuell von der Änderungsfortpflanzungen betroffen sind und einem Änderungsbedarf unterliegen, sind mit einer zusätzlichen Information wie beispielsweise einer Wahrscheinlichkeit oder einer Einflussstärke bestimmt. Ob ein Änderungsbedarf besteht, muss für diese Fabrikobjekte durch Expert*innen abschließend beurteilt werden.
 - *Änderungsbedarf:* Die aufgrund von Änderungsfortpflanzung betroffenen Fabrikobjekte und der zugehörige Änderungsbedarf sind bekannt und müssen nicht weiter überprüft oder spezifiziert werden.
- ***Einfluss der Änderung/en auf Produktionskennzahlen:***
 - *Beeinflusst:* Es ist bekannt, welche Produktionskennzahlen von der/den Änderung/en beeinflusst werden. Die Richtung des Einflusses oder die Höhe der Kennzahlenveränderung sind nicht bestimmt.
 - *Tendenz:* Für beeinflusste Kennzahlen wird bestimmt, in welche Richtung die Kennzahlenveränderung zu erwarten ist.
 - *Gewichtete Tendenz:* Für beeinflusste Kennzahlen wird bestimmt, in welche Richtung die Kennzahlenveränderung zu erwarten ist. Anhand einer Gewichtung wird eine relative Stärke zwischen den unterschiedlichen Einflüssen aufgezeigt.

- *Wertebereich*: Es wird durch eine Ober- und eine Untergrenze ein Wertebereich bestimmt, in welchem die Kennzahlenwerte nach der Änderung/en zu erwarten sind.
 - *Wahrscheinlichkeitsverteilung*: Die Veränderung der Produktionskennzahl/en aufgrund der/den Änderung/en wird quantitativ bestimmt. Da die Bewertung einer gewissen Planungsunsicherheit unterliegt, wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Veränderung der Kennzahlenwerte berechnet.
 - *eindeutiger Wert*: Die Veränderung der Produktionskennzahl/en aufgrund der/den Änderung/en wird quantitativ berechnet. Es steht ein eindeutiger Wert fest, welcher nach Änderungsdurchführung für die Kennzahl/en erwartet wird. Dieser kann sowohl einen sicheren Wert als auch einen Schätzwert darstellen.
- ***Änderungskosten und Änderungsaufwand*** sowie ***Umsetzungsdauer*** der Änderung/en:
 - *Wertebereich*: Es wird durch eine Ober- und eine Untergrenze ein Wertebereich bestimmt, in welchem Kosten, Aufwand und Umsetzungsdauer für die Änderung/en zu erwarten sind.
 - *Wahrscheinlichkeitsverteilung*: Für Kosten, Aufwand und Umsetzungsdauer werden Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt, welche im Gegensatz zu einem reinen Wertebereich detaillierte Informationen hinsichtlich den wahrscheinlichsten Wertebereichen liefern.
 - *eindeutiger Wert*: Es wird ein eindeutiger, quantitativer Wert für Kosten, Aufwand und Umsetzungsdauer kalkuliert. Dieser kann sowohl einen sicheren Wert als auch einen Schätzwert darstellen.

Durch die Kombination einer Zielsetzung mit einer ihrer Genauigkeiten wird ein Analysemodul und dessen notwendiges Ergebnis festgelegt. Vor dem Hintergrund eines flexiblen Automatisierungsgrads wird in jedem Modul zunächst ein möglichst hoher Automatisierungsgrad bei der Durchführung der jeweiligen Auswirkungsanalyse anstrebt. In Abhängigkeit von der gewählten Genauigkeit variiert dementsprechend der

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Gesamtautomatisierungsgrad der Analyse und der dafür notwendige Modellierungsaufwand. Ein universaler Analysebaustein „Expertenworkshop“ dient dazu, eine manuelle Alternative zur Durchführung einzelner Analyseschritte bereitzustellen.

Die Module ermöglichen somit eine direkte Verknüpfung mit den Informationsbedarfen der Anwendenden. Gleichzeitig können die Anforderungen hinsichtlich der Ausrichtung an fallspezifischen Rahmenbedingungen durch die unterschiedlichen Modellierungsaufwände adressiert werden. Da dies besonders durch die Modulauswahl im Rahmen des Process Tailoring erfolgt, wird hierauf in Kapitel 6 genauer eingegangen.

Durch die vollständige Kombination der Zielsetzungen mit den jeweiligen Genauigkeiten ergeben sich somit 21 Analysemodule (siehe Abbildung 5.4), wobei bereits festgehalten werden kann, dass die Module einer einzelnen Zielsetzung – unterschieden durch die Genauigkeit – hinsichtlich der Modulinhalte hohe Ähnlichkeiten aufweisen und auf die gleichen Modellierungsgrundlagen und Werkzeuge zurückgreifen. Aus diesem Grund werden die Analysemodule in Abschnitt 5.3 gegliedert nach den übergeordneten Zielsetzungen beschrieben.

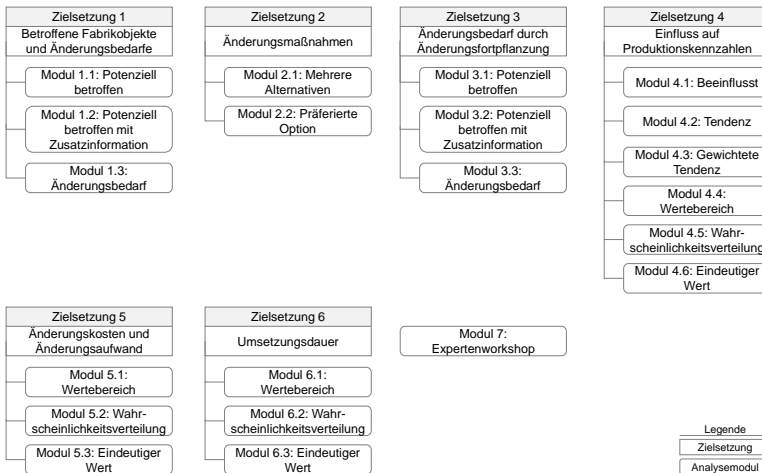


Abbildung 5.4: Übersicht der Module für die Analyse von Änderungsauswirkungen im Kontext der Produktion

5.2 Aufbau der Analysemodule

Ein Analysemodul stellt einen austauschbaren Analyseschritt, der eine geschlossene Funktionseinheit bildet, innerhalb des Gesamtprozesses der Analyse von Änderungsauswirkungen dar. Die Module sind dementsprechend grundsätzlich frei kombinierbar, wobei die Vorgehensweise in Kapitel 6 eine Richtlinie zur Gestaltung der individuellen Analyse für konkrete Anwendungsfälle zeigt.

Jedes Analysemodul aus Abschnitt 5.1 ist in die Bereiche **Vorbereitung** und **Durchführung** unterteilt (siehe Abbildung 5.5).

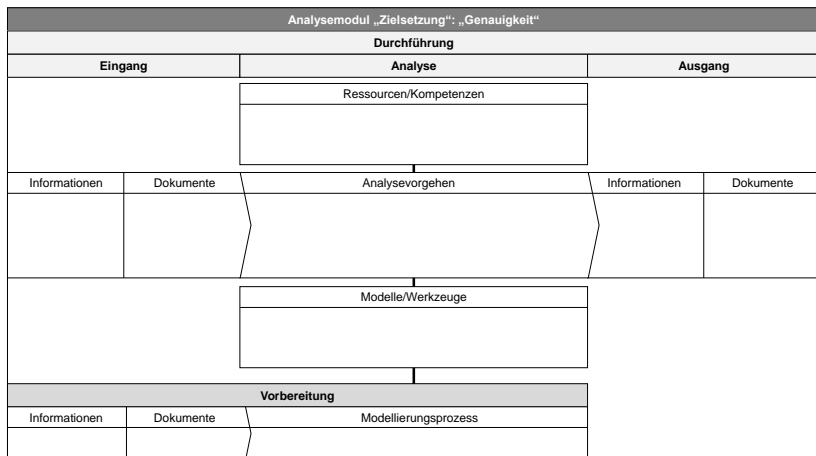


Abbildung 5.5: Aufbau eines Analysemoduls für die Analyse von Änderungsauswirkungen

Die **Vorbereitung** umfasst alle einmaligen, initialen Schritte, die zur Erstellung der notwendigen Modelle und Dokumente für das Analysemodul notwendig sind. Dafür werden die notwendigen Eingangsdokumente und Informationen sowie der Modellierungsprozess beschrieben.

Die **Durchführung** beschreibt das eigentliche Analyseverfahren, welches nach der Gestaltung der individuellen Analyse bei jeder Änderung durchgeführt wird. Sie ist in die Bestandteile **Eingang**, **Analyse** und **Ausgang** gegliedert. Das Ziel der Analysetätigkeiten jedes Moduls ist es, die gewünschte Zielsetzung in der gewünschten

Genauigkeit mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad zu bestimmen, um den Analyseaufwand bei wiederkehrenden Änderungen zu minimieren. Da ein höherer Automatisierungsgrad in der Regel eine detailliertere Systemmodellierung und somit mehr Vorbereitungszeit und Expertenwissen benötigt, adressiert die gewünschte Genauigkeit unter Berücksichtigung des Ziels der Automatisierung insbesondere die unterschiedlichen Rahmenbedingungen hinsichtlich verfügbarer Zeit, Expertenwissen, etc.

Der **Eingang** eines Moduls beschreibt alle notwendigen Dokumente und Informationen, welche – insbesondere hinsichtlich der Änderungen, aber auch bzgl. der Projektplanung wie z. B. dem Endzeitpunkt der Analyse – bei jeder Durchführung der Analyse benötigt werden. Die **Analyse** wiederum umfasst das Analyseverfahren, die hierfür notwendigen Modelle, die zur Verfügung stehenden Werkzeuge (z. B. Vorlagen) sowie die benötigten Ressourcen und Kompetenzen. Während für das Analyseverfahren sowie die Modellierung in dieser Arbeit grundsätzlich geeignete Lösungen ausgewählt wurden (siehe Abschnitt 5.3), können vor allem die Werkzeuge für die Analyse auch nach und nach erweitert werden. Aber auch die Modellierung kann im Einzelfall durch individuelle Modelle, welche den gleichen Informationsgehalt wie die in Abschnitt 5.3 beschriebenen Lösungen aufweisen, ersetzt werden. Der **Ausgang** beschreibt alle Analyseergebnisse hinsichtlich der Änderungsauswirkungen in Form von generierten Informationen und Dokumenten. Die Ergebnisse sind für jedes Analysemodul durch die Modularisierung eindeutig festgelegt.

5.3 Detaillierung der Analysemodule

Zur Gestaltung der Analysemodule wurden für die einzelnen Zielsetzungen und Genauigkeiten unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Methodik sowie der notwendigen und zu erwartenden Eingangsinformationen geeignete Analyseverfahren und Modelle ausgewählt bzw. entwickelt. Abschließend konnten auf dieser Basis die unterstützenden Werkzeuge und die Vorbereitungsprozesse abgeleitet werden.

In diesem Sinne erfolgt in den Abschnitten 5.3.1 bis 5.3.6 die Detaillierung der einzelnen Module in folgender Struktur: 1. Zielsetzung und Genauigkeit, 2. Modellierung, 3. notwendige Eingangsinformationen/-dokumente, 4. Analyseverfahren, 5. unterstützende Werkzeuge und 6. Vorbereitungsprozesse. Dabei werden pro Zielsetzung zunächst die

allgemeinen Inhalte, welche die jeweiligen Module gleichermaßen betreffen, beschreiben, bevor im Einzelnen spezifisch auf die Analysemodule eingegangen wird.

5.3.1 Zielsetzung 1: Durch eine Änderungsursache betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe

Zielsetzung und Genauigkeit

Die Zielsetzung der Analysemodule (Abbildung 5.6) ist es, eine direkte Verbindung zwischen der Änderungsursache sowie den Fabrikobjekten des Produktionssystems herzustellen. Zur Bündelung und Spezifizierung der Änderungsursachen wird dabei auf das Rezeptorenmodell (siehe Abschnitt 2.1.3) zurückgegriffen. Somit sollen die durch eine Veränderung eines Rezeptors beeinflussten Fabrikobjekte sowie damit einhergehende Änderungsbedarfe identifiziert werden.

„Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe“: „1.1 Potenziell betroffen; 1.2 Potenziell betroffen mit Zusatzinformation; 1.3 Änderungsbedarf“					
Durchführung					
Eingang		Analyse		Ausgang	
		Ressourcen/Kompetenzen • Änderungsmanager*in mit einem Überblick über die relevanten Produktionsbereiche und Stakeholder sowie ausgeprägtem Abstraktionsvermögen • Expert*innen der relevanten Produktionsbereiche			
Informationen	Dokumente	Analysevorgehen		Informationen	Dokumente
Modul 1.1: Kenntnis des sich verändernden Rezeptors bzw. dessen Eigenschaft(en) Modul 1.2: Kenntnis des sich verändernden Rezeptors bzw. dessen Eigenschaft(en) Modul 1.3: Quantifizierte Veränderung der Rezeptoreigenschaft(en)		1. Auswahl der veränderten Rezeptoren/Rezeptoreigenschaften 2. Identifikation relevanter Abhängigkeiten und Fabrikelemente 3. Analyse der Abhängigkeiten 4. Dokumentation der (potenziellen) Auswirkungen (Details pro Modul siehe Abbildung 5.9)		Modul 1.1: Potenziell beeinflusste Elemente/Eigenschaften Modul 1.2: Potenziell beeinflusste Elemente/Eigenschaften & Zusatzinformation Modul 1.3: Beeinflusste Elemente/Eigenschaften und verletzte Bedingung	
		Modelle/Werkzeuge DMM oder MDM zwischen Rezeptoren und Fabrikelementen • Modul 1.1: Klassische DMM/MDM • Modul 1.2: Numerische DMM/MDM mit Zusatzinformation • Modul 1.3: DMM/MDM mit mathematischen Bedingungen			
Vorbereitung					
Informationen	Dokumente	Modellierungsprozess DMM/MDM			
Dokumentationen/Modelle des betrachteten Systems, z. B. Wertstromanalyse, Layouts, etc.		1. Festlegung Rezeptoren und Fabrikfelder 2. Definition der Detaillierungsebene 3. Aufnahme der relevanten Elemente und Eigenschaften 4. Eintragung der Abhängigkeiten in modulspezifischer Detaillierung			

DMM: Domain-Mapping-Matrix
MDM: Multiple-Domain-Matrix

Abbildung 5.6: Analysemodule 1.1, 1.2 und 1.3

Durch das Analysemodul 1.1 mit der Genauigkeit „Potenziell betroffen“ wird eine Liste potenziell betroffener Fabrikelemente erzeugt. Diese müssen anschließend hinsichtlich möglicher Änderungsbedarfe untersucht werden. In Modul 1.2 „Potenziell betroffen

mit Zusatzinformation“ wird die Übersicht potenziell betroffener Elemente um eine zusätzliche Information, wie z. B. die Stärke des Einflusses der Rezeptorveränderung oder eine geschätzte Wahrscheinlichkeit eines Änderungsbedarfs, erweitert. Das Modul 1.3 „Änderungsbedarf“ liefert eine klare Aussage darüber, welche Fabrikelemente durch die Änderungsursache einem Änderungsbedarf unterliegen. Diese Information wird durch die Spezifikation des Grunds des Änderungsbedarfs in Form von den relevanten Eigenschaften des Rezeptors und des Fabrikelements vervollständigt.

Modellierung

Um die Abhängigkeiten zwischen Änderungsursachen bzw. Rezeptoren und den Elementen eines Produktionssystemen zu dokumentieren, wurden Domain-Mapping-Matrizen (DMM) als geeignete Modellierungsform identifiziert. Diese repräsentieren eine leicht verständliche Möglichkeit zur Beschreibung eines komplexen Systems, wie einem Fabrikssystem, und verknüpfen Elemente verschiedener Domänen (BROWNING 2001; LINDEMANN ET AL. 2009). Werden Abhängigkeiten anstatt mit einem einfachen „X“ als Matrixeintrag mit Zahlen eines definierten Werteraums spezifiziert, um beispielsweise die Stärke einer Beziehung darzustellen, wird dies als numerische DMM bezeichnet.

Bei der Analyse von Änderungsauswirkungen kommen sowohl klassische DMM (Modul 1.1) sowie numerische DMM (Modul 1.2) zum Einsatz (siehe Abbildung 5.7). In Modul 1.1 wird somit durch ein eingetragenes „X“ die Abhängigkeit zweier Eigenschaften dokumentiert. Durch die Änderungen einer Rezeptoreigenschaft kann auf ein potenziell betroffenes Fabrikobjekt bzw. dessen Eigenschaften hingewiesen werden. Durch die Spezifizierung der Abhängigkeit durch beispielsweise eine Stärke (z. B. mit einer Stärke von 1 = geringe Abhängigkeit bis 3 = starke Abhängigkeit) oder eine Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Änderungsbedarf wird die Information über potenzielle Änderungsauswirkungen in Modul 1.2 angereichert. In Modul 1.3 werden in der DMM quantifizierte, mathematische Bedingungen, die nach allen Änderungen erfüllt sein müssen, eingetragen, um eine automatische und sichere Überprüfung von Änderungsauswirkungen zu ermöglichen.

In den Zeilen der DMM werden die Änderungsursachen/Rezeptoren bzw. ihre Eigenschaften/Subrezeptoren gelistet, während die Elemente des betrachteten Produktionssystem in den Spalten aufgeführt werden. Somit ist die Leserichtung der DMM im Sinne der Auswirkungsanalyse als „Zeile beeinflusst Spalte“ bzw. „Änderungsursache beeinflusst Fabrikelement“ zu interpretieren.

Eingang		Beeinflussbare Elemente/Eigenschaften des Produktionssystems				Genauigkeit Ausgang						
		Eigenschaft A	Eigenschaft B	Eigenschaft C	Eigenschaft D							
Geändertes Element/ Geänderte Eigenschaft	▶	R1	R2	R3	R4	R5	Ro	X		X		Potenziell betroffen
									X		X	
Geändertes Element/ Geänderte Eigenschaft	▶	R1	R2	R3	R4	R5	Ro	1		2	3	Potenziell betroffen mit Stärke, Eintritts- wahrscheinlichkeit, ...
								10 %	90 %	0 %	46 %	
Neuer Wert der Eigenschaft	▶	R1	R2	R3	R4	R5	Ro	Wenn R2 > 50			Wenn X > R2 > Y	Änderungsbedarf
										Wenn R1 <= 40		

Abbildung 5.7: Modulspezifische Einträge in die DMM zur Modellierung von Abhängigkeiten zwischen Rezeptoren und Fabrikelementen

Die Detaillierungsebenen der Zeilen und Spalten können individuell je nach Kontext der Analyse gewählt werden, wobei beispielsweise einerseits die Einteilung des Rezeptorenmodells nach WONSAK ET AL. (2021) sowie MÖLLER (2008) und andererseits die Fabrikfelder Technik, Raum und Organisation nach WIENDAHL ET AL. (2014, S. 142) als grundlegende Orientierung dienen. So ergibt sich als übergeordnete Modellstruktur eine Multiple-Domain-Matrix (MDM), wobei jeder Rezeptor sowie jedes Fabrikfeld als eine Domäne betrachtet wird (siehe Abbildung 5.8). Alle Elemente einer Domäne können durch eine Eigenschaftsebene ergänzt werden.

		Produktionssystem/Fabrik			
		Technik	Raum	Organisation	...
		Fabrikelemente			
		Eigenschaften			
Rezeptoren	Produkt Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM
	Quantität Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM
	Zeit Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM
	Kosten Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM
	Qualität Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM
	Technologie Eigenschaften	DMM	DMM	DMM	DMM

Abbildung 5.8: Gesamtstruktur der MDM

Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente

Um mit den Analysemodulen 1.1 und 1.2 zu beginnen, ist es lediglich notwendig, den

Rezeptor (Änderungsursache) bzw. dessen relevante Eigenschaft auf der bei der Modellierung gewählten Detaillierungsebene zu kennen. Für Modul 1.3 muss die relevante Eigenschaft des Rezeptors quantifiziert werden, um die Überprüfung der definierten mathematischen Bedingungen zu ermöglichen.

Analyseverfahren

Zur Analyse der Auswirkungen der Änderungsursachen auf die Fabrikelemente werden die Zeilen der relevanten Rezeptorspezifikationen hinsichtlich Einträgen untersucht (Schritt 1 und Schritt 2). Anschließend werden alle identifizierten Zusammenhänge modulspezifisch ausgewertet (Schritt 3) und die Ergebnisse dokumentiert (Schritt 4). Der Analyseprozess ist in Abbildung 5.9 gesamtheitlich dargestellt.

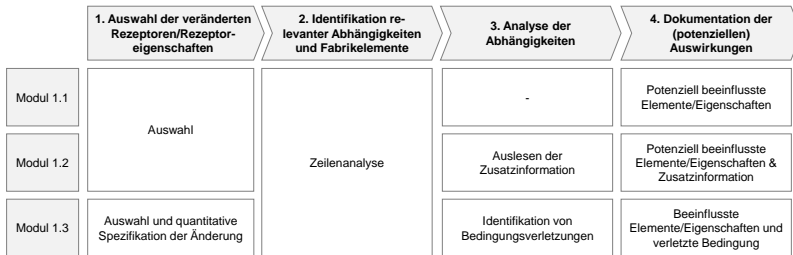


Abbildung 5.9: Modulspezifisches Analyseverfahren zur Identifikation von Änderungsbedarfen

In Modul 1.1 werden in Schritt 3 und 4 die mit der Änderungsursache in Abhängigkeit stehenden Produktionselemente ausgelesen und dokumentiert. In Modul 1.2 wird zusätzlich die eingetragene Detaillierung der DMM – z. B. Stärke des Einflusses, Wahrscheinlichkeit, etc. – entnommen. In Modul 1.3 wird überprüft, ob die eingetragenen Bedingungen zwischen Rezeptoren und Produktionselementen auch nach der quantifizierten Veränderung der Rezeptorspezifikation erfüllt sind. Wird eine Bedingung verletzt, wird das zugehörige Produktionselement in die Liste der Änderungsbedarfe aufgenommen und die Ursache durch die zugehörige Anforderung sowie die bestehende Abweichung detailliert.

Unterstützende Werkzeuge

Zur Modellierung wurden ein Excel-Template und ein Analysewerkzeug entwickelt, um v. a. die Schritte 2 bis 4 der Module zu unterstützen (siehe Abbildung 5.10). Im

Allgemein sind jedoch alle Werkzeuge zur Erstellung und Auswertung von Tabellen oder im spezifischen von DMM und MDM als Grundlage für die Module 1.1 bis 1.3 geeignet.

Auswahl einer geeigneten Bewertungsmethode							
Modul 1.1: Potenziell betroffen	Beeinflusst eine Änderung allgemein eine Eigenschaft des Produktionssystems ?						
Modul 1.2: Potenziell betroffen mit Eintrittswahrscheinlichkeit	Mit welcher Wahrscheinlichkeit beeinflusst eine Änderung eine Eigenschaft des Produktionssystems ?						
Modul 1.2: Kritikalitäts-Bewertung	Mit welcher Kritikalität beeinflusst eine Änderung eine Eigenschaft des Produktionssystems ? 1 = gering, 2 = mittel, 3 = stark						
Modul 1.3: Bedingungs-basierte Bewertung	Bei der Verletzung welcher "WENN ... DANN ..." Bedingung wird durch eine Änderung eine Eigenschaft des Produktionssystems beeinflusst ?						
Technik / Technologie	Beeinflussbare Eigenschaften: Technik/Technologie			Aktueller Wert der Produkteigenschaft eintragen			
	Kategorie	ID	Rezeptoreigenschaft	Wert	ID	BE_01	
		PE_01				X	
Raum- und Gebäudetechnik	Beeinflussbare Eigenschaften: Raum und Gebäudetechnik			Aktueller Wert der Produkteigenschaft eintragen			
	Kategorie	ID	Rezeptoreigenschaft	Wert	ID		
		PE_01					

Abbildung 5.10: Beispielhaftes Excel-Template und -Analysewerkzeug (Ausschnitt)

Ressourcen/Kompetenzen

Für die Durchführung der Module 1.1 bis 1.3 ist eine koordinierende Person – in der Regel der*die für die Analyse zuständige Änderungsmanager*in –, welche einen Überblick über die relevanten Bereiche und Stakeholder hat, notwendig. Die*Der Änderungsmanager*in sollte auf die Expert*innen der jeweiligen Produktionsbereiche zugehen können, um sowohl eine ganzheitliche Modellierung als auch eine kritische Diskussion der Analyseergebnisse zu ermöglichen. Besonders für die Modellierung und die damit verbundenen Expertengespräche sollte der*die Änderungsmanager*in ein ausgeprägtes Abstraktionsvermögen mitbringen, um die Erstellung der änderungsunabhängigen DMMs vorzunehmen.

Vorbereitung

Die Vorbereitung der Module umfasst die Erstellung der notwendigen DMMs/MDMs. Dabei sind jegliche Dokumentationen des betrachteten Systems hilfreich, die zur Identi-

fikation und Spezifikation der relevanten Rezeptoren/Rezeptoreigenschaften und Fabrikelemente beitragen. Dies kann Wertstromanalysen, Layouts, Prozessdarstellungen oder einfache Präsentationsunterlagen beinhalten.

Zunächst werden durch die Festlegung der betrachteten Rezeptoren und der relevanten Fabrikfelder des fokussierten Produktionssystems die Systemgrenzen gesetzt (siehe Abbildung 5.8). Anschließend gilt es, die Detaillierungsebene der Modellierung für die einzelnen Domänen zu wählen, bevor die Expert*innen die relevanten Elemente und Eigenschaften in die Zeilen und Spalten der DMMs eintragen. Abschließend erfolgt die Befüllung der Verknüpfungen in der jeweiligen Form des Moduls. Sollten detailliertere bzw. weniger detaillierte Informationen als benötigt vorliegen, ist grundsätzlich auch eine Kombination von Modulen möglich. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch die Analyseergebnisse dementsprechend eine heterogene Genauigkeit aufweisen und unterschiedlich weiterverarbeitet werden müssen. Dennoch ist diese Kombination von Modulen vor allem, wenn eine Mischung aus klar quantifizierbaren und qualitativen Abhängigkeiten vorliegt, als zielführend für eine effiziente Analyse anzusehen.

5.3.2 Zielsetzung 2: Notwendige Änderungsmaßnahmen in der Produktion

Zielsetzung und Genauigkeit

Die Analysemodule 2.1 und 2.2 dienen der Entscheidung über notwendige Änderungsmaßnahmen aufgrund eines identifizierten Änderungsbedarfs (siehe Abbildung 5.11). Dabei können entweder mehrere Änderungsalternativen (Modul 2.1) für die weitere Analyse festgelegt oder bereits eine präferierte Option (Modul 2.2) ausgewählt werden. Die relevanten Änderungsalternativen werden abschließend in Form von Änderungssteckbriefen dokumentiert.

Modellierung

Die Entscheidung über Änderungsmaßnahmen stellt einen manuellen und expertenbasierten Schritt der Auswirkungsanalyse dar. Eine festgelegte Modellierung als Analysewerkzeug oder zur Automatisierung der Analyse ist dementsprechend nicht zwingend notwendig. Dennoch können jegliche Informationen über das Produktionssystem als

5.3 Detaillierung der Analysemodule

„Änderungsmaßnahmen“: „2.1 Mehrere Alternativen; 2.2 Präferierte Option“					
Durchführung					
Eingang		Analyse		Ausgang	
		Ressourcen/Kompetenzen <ul style="list-style-type: none"> • Dokumentationen/Modelle des betrachteten Systems, z. B. Wertstromanalyse, Layouts, etc. • Workshop-Moderator*in, -Materialien und -Raum • Expert*innen der relevanten Produktionsbereiche 			
Informationen	Dokumente	Analysevorgehen		Informationen	Dokumente
Kenntnis der Änderungsursache sowie der betroffenen Fabrikelemente; bestenfalls bereits Entscheidung über Änderungsbedarfe an den betroffenen Fabrikelementen Kenntnis der Stakeholder der Änderung		Durchführung eines Expertenworkshops 1. Workshopvorbereitung: Terminfindung, Einladung, Materialien, ... 2. Anfangsphase: Themenvorstellung, Vorstellungsrunde, ... 3. Arbeitsphase: Gestaltung und Bewertung von Änderungskonzepten 4. Abschlussphase: Erstellung von Änderungssteckbriefen 5. Workshop-Nachbereitung: Erstellung und Versendung des Protokolls		Modul 2.1: Änderungssteckbriefe für alternative Änderungskonzepte mit initialer Befüllung der Abschnitte 1 bis 5 Modul 2.2: Änderungssteckbrief eines präferierten Änderungskonzepts mit initialer Befüllung der Abschnitte 1 bis 5	
		Modelle/Werkzeuge <ul style="list-style-type: none"> • Checklisten zur Workshopvorbereitung • Vorlage Änderungssteckbrief • Standard-Workshopmethoden 			
Vorbereitung					
Informationen	Dokumente	Workshopvorbereitung			
keine		<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl und Gestaltung von Standard-Methoden für die Phasen des Workshops • Ggf. Definition von Bewertungskriterien für die Änderungskonzepte (primär bei Modul 2.2) • Definition der Workshop-Ziele und Erstellung der Standard-Agenda 			

Abbildung 5.11: Analysemodule 2.1 und 2.2

Unterstützung zur Verfügung gestellt werden. Dabei sind besonders Dokumente hervorzuheben, die die betroffenen Elemente des Produktionssystems sowie deren Vernetzung im Gesamtsystem genauer beschreiben, wie z. B. Wertstromanalysen oder Materialflussmatrizen. Somit sind Synergien zwischen der Modellierung der Module 3.1 bis 3.3 und der Bestimmung von Änderungsmaßnahmen vorhanden.

Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente

Um mit der Auswahl von Änderungsmaßnahmen zu beginnen, müssen die Beschreibung der Änderungsursache und die betroffenen Elemente des Produktionssystems bekannt sein. Für die Module 1.1 und 1.2 sowie 3.1 und 3.2 dienen die Module 2.1 und 2.2 auch zur finalen Entscheidung über mögliche Änderungsbedarfe². Bestenfalls sind zu Beginn der Analysemodule 2.1 und 2.2 die Änderungsbedarfe bereits zuvor detailliert analysiert und beschrieben, wie es durch die Module 1.3 und 3.3 ermöglicht wird. Zur Vorbereitung der Analyse ist es zusätzlich sinnvoll, die relevanten Stakeholder zu

² Die detaillierte Betrachtung der Modulabhängigkeiten und der empfohlenen Kombinationsmöglichkeiten erfolgt in Kapitel 6.

kennen, wobei diese in der Regel auch anhand des betroffenen Produktionsbereichs identifiziert werden können.

Analyseverfahren

Die Identifikation und Diskussion von alternativen Änderungsmaßnahmen erfolgt in Form eines Expertenworkshops. Dieser kann bei der Bündelung von Änderungsbedarfen auch die Analyse mehrerer Änderungen umfassen.

Als Workshops werden geplante und vorbereitete Arbeitsrunden, die unter Anleitung eines Moderators eine Thematik bearbeiten, bezeichnet (LIPP & WILL 2008, S. 13). Die Teilnehmenden sind Spezialist*innen der Problemstellung und es werden Ergebnisse erarbeitet, die über den Workshop hinaus wirken (BEERMANN ET AL. 2015, S. 6). Es steht somit das gemeinsame Entwickeln von Neuem oder Besserem im Fokus (LIENHART 2015, S. 11). Die Zielsetzung des Workshops entspricht der Zielsetzung des Analysemoduls im Hinblick auf die spezifische Änderung, die es zu analysieren gilt.

Die Durchführung des Workshops ist in eine Anfangsphase, eine Arbeitsphase und eine Abschlussphase gegliedert (LIENHART 2015, S. 78). Diese werden von der Workshop-Vorbereitung und der Workshop-Nachbereitung umschlossen (LIPP & WILL 2008; OBERHOLZER ET AL. 2015).

Die Vorbereitung teilt sich in diesem Modul auf eine allgemeine Modulvorbereitung sowie die Workshopvorbereitung bei jeder Analyse auf. Während die detaillierte Zielfestlegung, die Klärung der Rahmenbedingungen und die Definition der Standard-Agenda sowie ggf. von Hausaufgaben einmalig bei der Modulkonfiguration durchzuführen sind, muss der*die Änderungsmanager*in – welche*r als Hauptverantwortliche*r und Moderator*in des Workshops fungiert –

- die Terminfindung und Raumfindung übernehmen,
- die Einladungen an die Teilnehmenden mit einer Zusammenfassung der Agenda, der im Workshop zu besprechenden Änderungen und ggf. einer Hausaufgabe verschicken und
- die Materialien und Dokumente sowie den Workshop-Raum vorbereiten.

In der Anfangsphase des Workshops erfolgt die Einführung in das Thema des Workshops. Diese umfasst die Vorstellung

- der zu analysierenden Änderungsbedarfe,
- der Ziele des Workshops (gewählte Zielsetzung und Genauigkeit),
- der Einbindung des Workshops in den Änderungsmanagement-Prozess sowie in die Analyse der Änderungsauswirkungen inklusive
- der bisherigen Analyseergebnisse (benötigte Eingangsinformationen des Analysemoduls) und
- der anschließenden Analyseschritte.

In der Arbeitsphase erfolgen die Identifikation und Vorauswahl von Änderungsmaßnahmen zur Reaktion auf den/die bestehenden Änderungsbedarf/e. Hierzu werden im Sinne eines Problemlösungsworkshops zunächst die Änderungsbedarfe selbst diskutiert, um ein einheitliches Verständnis dieser zu erlangen sowie die Bedeutung für die betroffenen Bereiche zu präzisieren. Anschließend werden in einem Brainstorming mögliche Änderungen zur Behebung der Änderungsbedarfe zunächst ohne Bewertung gesammelt. In einer ersten Diskussion der Machbarkeit werden zu aufwendige oder nicht umsetzbare Änderungen ausgeschlossen. In Analysemodul 2.1 dient die resultierende Liste an Änderungsalternativen als Basis für die weiteren Schritte der Auswirkungsanalyse, in welchen ein detaillierterer Vergleich der Optionen erfolgt. In Analysemodul 2.2 gilt es, in einer groben Vorbewertung anhand in der Vorbereitung festgelegter Kriterien eine favorisierte Änderungsalternative für die weitere Analyse zu wählen. Dabei können unterschiedliche Bewertungsverfahren wie beispielsweise eine Nutzwertanalyse (PAWELLEK 2014, 59 f.) oder ein paarweiser Vergleich (SAATY 1988) zum Einsatz kommen. Wurde in der Konfiguration der Änderungsanalyse die Identifikation von Änderungsfortpflanzungen als notwendiges Modul gewählt, sollte dieses an dieser Stelle in den Workshop integriert werden. Hierdurch wird ein iteratives Durchlaufen der Module der Zielsetzungen 2 und 3 im Rahmen des Termins ermöglicht. Zum Abschluss erfolgt die Zusammenfassung und Dokumentation der Workshopergebnisse in Form eines Änderungssteckbriefs (siehe Abbildung 5.12), welcher im Rahmen der Nachbereitung als Protokoll verschickt wird. Werden mehrere Änderungsalternativen weitergegeben, wird zunächst pro Alternative ein Steckbrief erstellt, um später eine finale Auswahl zu treffen.

Unterstützende Werkzeuge

Für unterstützende Werkzeuge kann in einschlägiger Literatur sowie online auf eine Vielzahl an Checklisten und Leitfäden für die Durchführung von Workshops zurückgegriffen werden (siehe unter anderem BEERMANN ET AL. (2015) oder LIENHART (2015)). Da diese für die Anwendung im Rahmen der Analyse von Änderungsauswirkungen nicht speziell angepasst werden müssen, werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter spezifiziert.

Des Weiteren steht für die abschließende Beschreibung der Änderungen bzw. Änderungsalternativen ein Änderungssteckbrief in Anlehnung an KOCH (2017) zur Verfügung (siehe Abbildung 5.12). Dieser dient auch im weiteren Verlauf der Analyse als Dokumentationsform für die ausgewählten Analyseergebnisse und kann individuell um weitere Änderungseigenschaften (siehe z. B. Abbildung 2.3) ergänzt werden. In den Modulen 2.1 und 2.2 werden – ggf. in Iteration mit den Modulen der Zielsetzung 3 – die Inhalte eins bis vier des Steckbriefs sowie die Kurzbeschreibungen der Maßnahmen (Abschnitt fünf) befüllt (siehe Abbildung 5.12).

Ressourcen/Kompetenzen

Für die erfolgreiche Durchführung des Workshops werden die jeweiligen Expert*innen der betroffenen Bereiche benötigt. Zur Leitung des Termins sollte der*die Änderungsmanager*in als hauptverantwortliche Person idealerweise Moderationserfahrung aufweisen und auf umfangreiches Moderationsmaterial und geeignete Räumlichkeiten zugreifen können.

Vorbereitung

Alle Schritte der Workshop-Vorbereitung, -Durchführung und -Nachbereitung sind in den Modulen 2.1 und 2.2 durchzuführen. Einmalige Vorbereitungen betreffen die Auswahl und die Gestaltung von Standard-Methoden für die einzelnen Phasen des Workshops. So kann eine einfache Wiederholbarkeit und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von mehreren Durchführungen ermöglicht werden. Soll eine Bewertung von Änderungsalternativen erfolgen, müssen die Bewertungskriterien für die gewählte Methode definiert werden. Des Weiteren werden die Workshop-Ziele und die Agenda bereits in der Vorbereitung festgelegt.

Änderungssteckbrief			
1. Rahmendaten			
ID _____	Bezeichnung _____		
Datum _____	Bezugsobjekt _____		
Verantwortlich _____	Status _____		
2. Änderungsursache, -bedarf und Zielsetzung der Änderung			
Änderungsursache _____		Resultierender Änderungsbedarf _____	
_____		_____	
_____		_____	
3. Betroffene Produktionsbereiche und Ansprechpartner			
Produktionsbereich _____		Ansprechpartner _____	
_____		_____	
_____		_____	
4. Beschreibung des Änderungskonzepts			

5. Notwendige Maßnahmen im Falle einer Umsetzung			
Kurzbeschreibung	Dauer	Personalaufwand	Kosten
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
6. Auswirkungen auf Produktionskennzahlen			
Kennzahl	Beschreibung bzw. Quantifizierung der Auswirkung		
_____	_____		
_____	_____		
_____	_____		

Abbildung 5.12: Änderungssteckbrief in Anlehnung an KOCH (2017) und RÖSSING (2007)

5.3.3 Zielsetzung 3: Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe durch Änderungfortpflanzungen

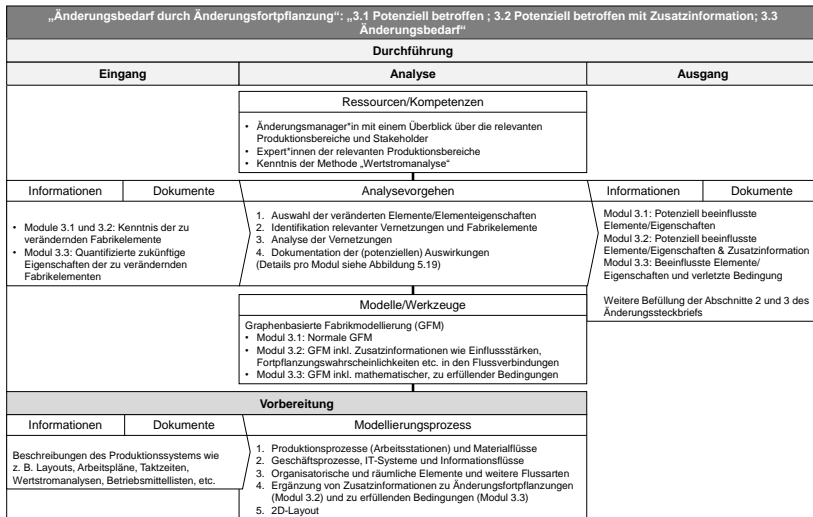
Zielsetzung und Genauigkeit

Einzelne Änderungsmaßnahmen in der Produktion können nur selten isoliert von dem Gesamtsystem betrachtet werden. Durch den hohen Vernetzungsgrad der Fabrikelemente kommt es wie in Kapitel 2 beschrieben zu sog. Änderungfortpflanzungen, also weiteren Änderungsbedarfen aufgrund einer initialen geplanten Änderung. Die Module 3.1 bis 3.3 zielen darauf ab, die durch eine Änderungsmaßnahme entstehenden Änderungfortpflanzungen zu identifizieren, damit geeignete weitere Maßnahmen zur

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Vervollständigung des Gesamtkonzepts zur Änderungsdurchführung entwickelt werden können.

Analog zu den Modulen 1.1 bis 1.3 können Änderungsbedarfe aufgrund von Änderungsfortpflanzungen in drei Genauigkeitsstufen bestimmt werden (siehe Abbildung 5.13). Durch das Analysemodul 3.1 mit der Genauigkeit „Potenziell betroffen“ wird eine Liste potenziell betroffener Fabrikelemente erzeugt. Diese müssen anschließend hinsichtlich möglicher Änderungsbedarfe untersucht werden. In Modul 3.2 „Potenziell betroffen mit Zusatzinformation“ wird die Übersicht potenziell betroffener Elemente um eine zusätzliche Information, wie z. B. die Stärke des Einflusses oder eine geschätzte Wahrscheinlichkeit eines Änderungsbedarfs, erweitert. Das Modul 3.3 „Änderungsbedarf“ liefert eine klare Aussage darüber, welche Fabrikelemente durch Änderungsfortpflanzungen einem Änderungsbedarf unterliegen. Diese Information wird durch die Spezifikation des Grunds des Änderungsbedarfs in Form der relevanten Eigenschaften der Fabrikelemente vervollständigt.



GFM: Graphenbasierte Fabrikmodellierung

Abbildung 5.13: Analysemodule 3.1 bis 3.3

Da in der Regel ein komplexes System betrachtet wird, ist es kaum möglich, das Modul 3.3 vollumfänglich und automatisiert für alle Vernetzungen durchzuführen. Sollte Modul

3.3 zum Einsatz kommen, ist dementsprechend eine Kombination entweder mit Modul 3.1 oder mit Modul 3.2 vorgesehen.

Modellierung

Um Änderungsfortpflanzungen in einem Produktionssystem zu identifizieren, müssen die Vernetzungen der Fabrikelemente bekannt sein. Die Produktion wird dabei durch acht Vernetzungsarten, sog. Flüsse, geprägt (WIENDAHL ET AL. 2005, 24 f.)³: Materialflüsse, Energieflüsse, Medienflüsse, Informationsflüsse, Kommunikationsflüsse, Personalflüsse, Werteflüsse und Kraftflüsse.

Für die Analyse der Produktion als Flusssystem ist die Wertstromanalyse eine weit verbreitete und standardisierte Methode, welche als Grundlage für die graphenbasierte Fabrikmodellierung (GFM) in den Modulen 3.1 bis 3.3 dient. Die grundlegende Wertstromanalyse ermöglicht es bereits, Produktions- und Steuerungsprozesse bzw. Produktionsstationen/Lager sowie die vernetzenden Material- und Informationsflüsse abzubilden (ERLACH 2010; ROTHER & SHOOK 2009). Durch die Weiterentwicklung zur Wertstromanalyse 4.0 werden des Weiteren Datenhaltungs-/Informationssysteme – dargestellt durch Swimlanes (horizontale Linien unterhalb der dargestellten und erfassten Prozesse) – in die Betrachtung mit einbezogen (MEUDT 2020; MEUDT ET AL. 2016).

Für eine ganzheitliche Modellierung einer Fabrik zur Analyse von Änderungsauswirkungen gilt es, die weiteren Elemente, wie beispielsweise Betriebsmittel einzelner Arbeitsstationen/-schritte, die zusätzlichen Arten von Flussverbindungen und die Layout-Betrachtung in die GFM zu integrieren. Im Folgenden wird auf die Erweiterungen der Wertstromanalyse als Basis für die GFM zur Analyse von Änderungsfortpflanzungen eingegangen⁴. Dabei wurden primär die einzelnen Bestandteile der Wertstromanalyse wie Arbeitstationen, Lagersysteme und Flussverbindungen durch zusätzliche Details, welche für eine ganzheitliche Modellierung benötigt werden, ergänzt. Des Weiteren wurden organisatorische Elemente, welche nicht durch das Flusssystem beschrieben

³ Eine Definition der Flussarten ist in Anhang A.1 zu finden.

⁴ Für die Erstellung der GFM wurden zunächst die Elemente einer Fabrik literaturbasiert zusammengetragen und anschließend Schritt für Schritt in das Modellierungskonzept integriert. Die berücksichtigten Elemente basieren insbesondere auf ARNOLD & FURMANS (2009), EVERSHEIM (2002), EVERSHEIM & SCHUH (1999), GUDEHUS (2011), HEGER (2007), HERNÁNDEZ MORALES (2003), HOMPEL (2018), MIESE (1976), NOFEN (2006), PLEHN ET AL. (2015b), REINHART (2017), SCHENK ET AL. (2014), STEINBAUER (2012), WESTKÄMPER (2009) & WIENDAHL ET AL. (2005).

werden, identifiziert. Während beispielsweise das Logistikkonzept eines Produktionssystems indirekt durch die Darstellung der Lagersysteme, Material- und Informationsflüsse nachvollziehbar ist, wird die Mitarbeiterorganisation z. B. in Form von Schichtplänen durch die reine Abbildung der Produktionsprozesse nicht aufgezeigt.

Grundsätzlich wird für die Detaillierung der einzelnen Elemente der Wertstromanalyse das Produkt-Prozess-Ressource (PPR)-Konzept genutzt, welches bereits im Rahmen der Analyse von Änderungsauswirkungen von X.-L. HOANG ET AL. (2017b) zum Einsatz kommt und als Grundlage für die Modellierung von Produktionssystemen verbreitet ist (siehe z. B. AHMAD ET AL. (2018), BAQAR RAZA & HARRISON (2011) & TOLIO ET AL. (2010)). Produkte stellen dabei den Input bzw. Output der Produktionsprozesse dar (STANEV 2012, 9 f.). Die Prozessdurchführung wird durch die Verwendung der Produktionsressourcen ermöglicht.

Modellierung von Flussverbindungen und Abhängigkeiten

In der Wertstromanalyse werden Material- und Informationsflüsse dokumentiert. Hinsichtlich Materialflüssen wird graphisch unter anderem zwischen den Steuerungsarten Push, Pull und FiFo unterschieden. Informationsflüsse können als analoge oder elektrische Flüsse abgebildet und mit einem Informationskasten hinsichtlich des Informationsinhalts versehen werden. In der Modellierung für die Analyse von Änderungsauswirkungen sollen die weiteren Flussarten analog zu den Informationsflüssen als einfache Pfeilverbindungen dargestellt werden. Diese werden einerseits anhand eindeutiger Symbole voneinander unterschieden. Andererseits werden alle Flussverbindungen um einen detaillierten Eigenschaftskasten erweitert. Dieser definiert neben der Art der Flussverbindungen die Inhalte und Produktionselemente, welche für die Flussverbindung benötigt werden (siehe Abbildung 5.14 a-b)). Im Sinne der PPR-Struktur beinhaltet die Beschreibung einer Flussverbindung die Art der Flussverbindung, das Steuerungsprinzip, das Transportgut, die Prozessschritte des Transports von Eingang/Aufnahme über Transport bis Ausgang/Ablage, sowie die benötigten durchführenden und unterstützenden Elemente. Ein Beispiel für die Darstellung einer Push-Materialflussverbindung, welche mittels eines fahrerlosen Transportsystems einen Teil der Komponenten eines Getriebemotors transportiert, ist in Abbildung 5.14 c) dargestellt. Eine Informationsflussverbindung per WLAN zwischen einem Werkerassistenzsystem und dem Manufacturing Execution System, durch welche die Arbeitsanweisungen übertragen werden, ist ebenso aufgezeigt (siehe Abbildung 5.14 d)). Sonstige (z. B. kausale) Abhängigkeiten, welche nicht anhand

des Flusssystems beschrieben werden können, werden ebenso modelliert und lediglich durch ihre Bezeichnung spezifiziert.

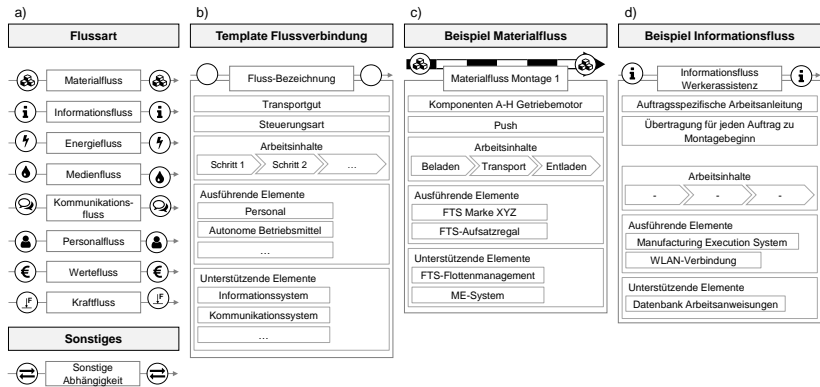


Abbildung 5.14: Darstellungen von Flussverbindungen bei der Modellierung des Produktionssystems: a) mögliche Flussarten, b) Template der Modellierung einer Flussverbindung, c) Beispiel Materialfluss und d) Beispiel Informationsfluss

Eine Flussverbindung beginnt und endet immer an Produktionselementen, welche den jeweiligen Eingang/Ausgang bereitstellen.

Modellierung der Fertigungs- und Montagestationen

In der Wertstromanalyse werden Prozessschritte, welche häufig einzelne Arbeitsstationen oder Maschinenarbeitsplätze repräsentieren, als Prozesskästen dargestellt. Diese werden anhand von Kennzahlen weiter beschrieben. Die einzelnen Elemente der Stationen, wie beispielsweise die benötigten Betriebsmittel, werden nicht weiter aufgezeigt. Für die Analyse von Änderungsauswirkungen können jedoch auch diese relevant sein. Um die Modellierung von Fertigungs- und Montagestationen zu unterstützen, wurde eine Darstellung einer Arbeitsstation mit einer erweiterbaren Auswahl an Systemelementen entwickelt (siehe Abbildung 5.15). Die Standardstation baut auf den Grundkonzepten des Transformationsprozesses (Eingang, Prozess, Ausgang) des normierten Fertigungsplatzes von SCHENK ET AL. (2014, S. 168) und dem PPR-Modell auf und integriert die graphische Modellierung der möglichen Systemelemente. Die Kennzahlen werden weiterhin für die komplette Station aufgenommen. Weitere Eigenschaften von Systeme-

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

melementen können bei Bedarf im/unter dem Element dokumentiert werden (siehe Handhabungssystem in Abbildung 5.15)

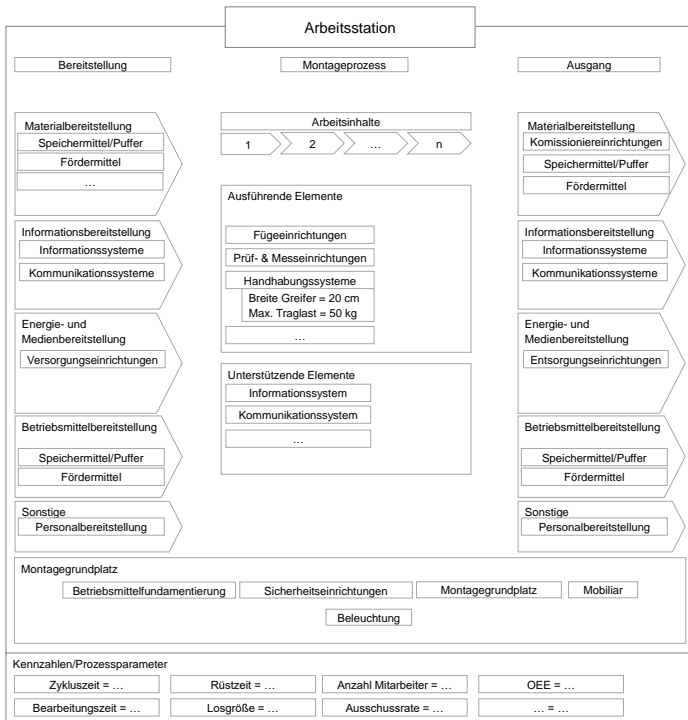


Abbildung 5.15: Darstellungen von Arbeitsstationen bei der Modellierung des Produktionssystems

Die Standardstation ersetzt in der Modellierung die Prozesskästen der Wertstromanalyse. Sie werden ebenso zur Abbildung von Arbeitsplätzen in der Lagerhaltung, wie beispielsweise dem Wareneingang, genutzt. Die Lagersysteme selbst werden im Folgenden betrachtet.

Modellierung von Lagersystemen

Während die Wertstromanalyse primär die Steuerungsart von Lagern unterscheidet, sind für eine ganzheitliche Betrachtung genauso die Lagereinrichtung (z. B. Hochregal, Fachbodenregal), die Lagereinheit (Palette, Kleinteilebehälter, Gitterbox, etc.) und die

Lagerbedienung relevant. Des Weiteren müssen relevante Eigenschaften wie flächenbezogene Kennzahlen (z. B. die Gangbreite) beschrieben werden. Zur Modellierung eines Lagers wird dementsprechend eine Klassifikation in Form von Abbildung 5.16 genutzt.

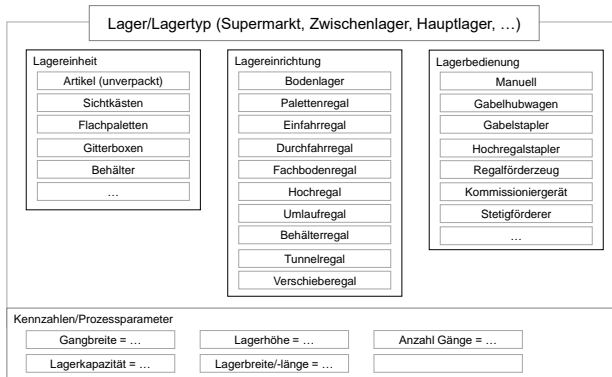


Abbildung 5.16: Darstellungen von Lagerelementen bei der Modellierung des Produktionssystems

Modellierung von übergeordneten organisatorischen und räumlichen Elementen sowie informationstechnischen Systemen

Durch die bisherige Darstellung werden primär die technischen Elemente sowie die räumlichen Aspekte auf den Ebenen „Arbeitsstation“ und „Prozesse“ abgebildet. Des Weiteren werden organisatorische Elemente wie z. B. das Logistikkonzept ebenso indirekt aufgezeigt. Entsprechend der Einordnung nach WIENDAHL ET AL. (2014) müssen noch weitere organisatorische Elemente (z. B. das Arbeitsmodell) und räumliche Aspekte auf Bereichs- und Fabrikebene (z. B. Entsorgungsanlagen) integriert werden.

Da diese übergeordneten Elemente zwar für das gesamte System relevant sein können, aber trotz dessen direkte Vernetzungen bzw. Abhängigkeiten zu einzelnen Fabrikelementen aufweisen, werden sie gemeinsam mit den informationstechnischen Systemen in Form von Swimlanes abgebildet. Dies ermöglicht eine Verbindung mit dem gesamten Fabrikssystem ohne unnötige Komplexität in der Visualisierung zu erzeugen (siehe Abbildung 5.17).

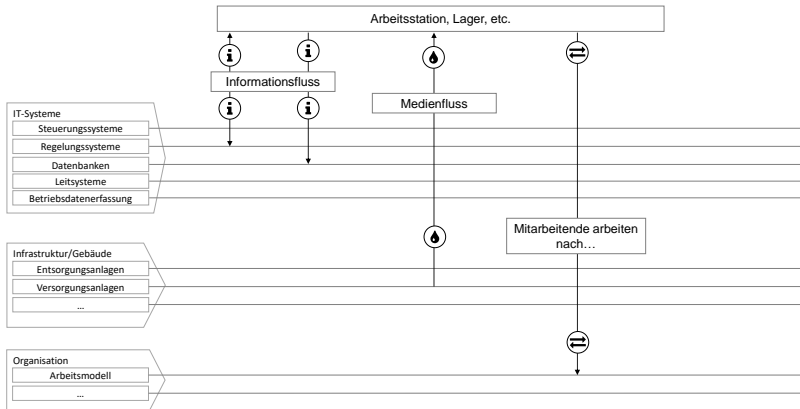


Abbildung 5.17: Modellierung von übergeordneten organisatorischen und räumlichen Elementen sowie informationstechnischen Systemen mit Swimlanes

Bezüglich der übergeordneten Elemente bildet die Layoutmodellierung einen Ausnahmefall. Diese stellt eine stark visuell geprägte Themenstellung dar, welche nicht sinnvoll durch Swimlanes aufgezeigt werden kann. Gleichzeitig sind 2D-Layout-Zeichnungen grundsätzlich in jedem Produktionssystem verfügbar bzw. zumindest in Form eines Blocklayouts einfach darzustellen. Um die Layoutanalyse bei der Betrachtung von Änderungsauswirkungen berücksichtigen zu können, wird die vorgestellte graphenbasierte Modellierung mit dem jeweiligen 2D-Layout des Fabriksystems im Hintergrund durchgeführt.

Modellspezifikationen für die Analyse von Änderungfortpflanzung

Um anschließend die Fortpflanzungsanalyse durchzuführen, stellen die Module einzelne Anforderungen an die Erweiterung der beschriebenen Basis-Modellierung (siehe Abbildung 5.13).

Modul 3.1 analysiert lediglich die bestehenden Vernetzungen des zu ändernden Fabelementes und identifiziert alle direkt über eine Flussverbindung angebotenen Elemente sowie die Inhalte (Arbeitsinhalte, ausführende Elemente, etc.) der jeweiligen Flussverbindung als potenziell beeinflusste Elemente. Somit sind keine zusätzlichen Informationen in der Modellierung notwendig. Für die Analyse in Modul 3.2 werden die einzelnen Vernetzungen mit den gewünschten Zusatzinformationen – z. B. Stärke

der Vernetzung oder geschätzte Wahrscheinlichkeit einer Änderungsfortpflanzung durch die Vernetzung – versehen (siehe Abbildung 5.18). Sollen eindeutige Änderungsbedarfe aufgrund von Änderungsfortpflanzungen durch Modul 3.3 bestimmt werden, müssen mathematische Bedingungen oder eindeutige Regeln zwischen den Fabrikelementen und ihren Eigenschaften definiert werden. Diese können sowohl als Bedingungen, welche für das gesamte Produktionssystem gelten, als auch als Bedingungen für spezifische Fabrikelemente definiert werden. Sollen Zielwerte für Produktionskennzahlen als Bedingungen definiert werden, ist es sinnvoll, Analysemodul 3.3 mit den Analysemodulen 4.4 bis 4.6 gemeinsam durchzuführen. Da es in Modul 3.3 aufgrund der Komplexität von Produktionssystemen kaum möglich ist, alle Abhängigkeiten in diesem Detaillierungsgrad zu spezifizieren, ist in der Regel eine Kombination mit Modul 3.1 oder 3.2 notwendig und in der Modellierung entsprechend zu berücksichtigen.

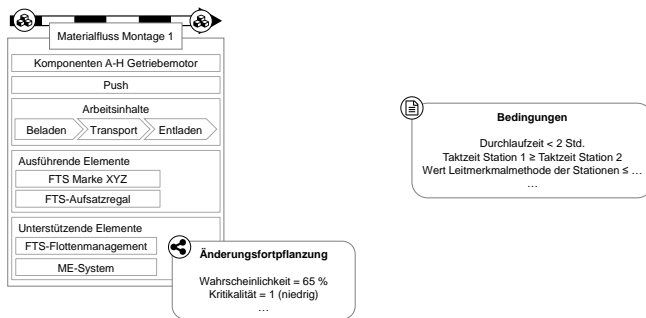


Abbildung 5.18: Modellierung von Zusatzinformationen und Bedingungen

Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente

Für die Analysen der Module 3.1 und 3.2 ist es lediglich notwendig, die zu verändernden Elemente des Fabriksystems zu kennen. Ausgehend von diesen können die Vernetzungen dieser Elemente überprüft werden. Für Analysemodul 3.3 müssen zur Überprüfung der Bedingungen und Regeln genauere Informationen bzgl. der Änderungen im Hinblick auf die zukünftigen Eigenschaftswerte der Elemente bereitgestellt werden.

Analyseverfahren

Die Analyse von Änderungsfortpflanzungen der Module 3.1 bis 3.3 gliedert sich in vier sequenzielle Schritte (siehe Abbildung 5.19).

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

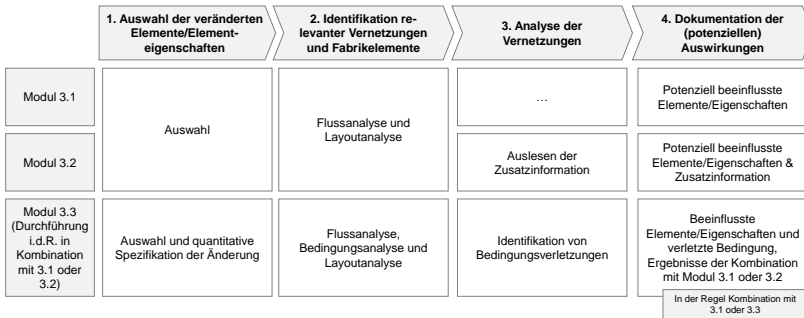


Abbildung 5.19: Modulspezifisches Analyseverfahren zur Identifikation von Änderungsförpflanzungen

Zunächst werden die zu verändernden Elemente des Produktionssystems in dem erstellten Modell identifiziert und ausgewählt. Sollen in Modul 3.3 Bedingungen und Regeln geprüft werden, werden die Eigenschaftsänderungen der Elemente spezifiziert. Anschließend werden die potenziell beeinflussten Elemente durch eine Vernetzungsanalyse ausgehend von den zu ändernden Elementen identifiziert. Während in jedem Fall direkt vernetzte Elemente – also Flussverbindungen des zu ändernden Elements und mit diesen angeknüpfte Elemente – betrachtet werden sollten, können grundsätzlich auch Vernetzungen zweiten oder dritten Grades berücksichtigt werden. Zusätzlich erfolgt eine manuelle Analyse des Fabriklayouts, um platzbedingte Auswirkungen zu identifizieren. In Modul 3.3 werden des Weiteren Bedingungen und Regeln, welche die Änderungen beinhalten, identifiziert. Im dritten Schritt erfolgt in Modul 3.2 das Auslesen der modellierten Zusatzinformation, während in Modul 3.3 die relevanten Bedingungen und Regeln hinsichtlich ihrer Erfüllung überprüft werden. Sollten Bedingungen oder Regeln verletzt werden, zeigt dies einen Änderungsbedarf an. Abschließend werden die Ergebnisse der Analyse im Änderungssteckbrief aus Abbildung 5.12 dokumentiert. Dies kann die potenziell beeinflussten Fabrikelemente, die jeweiligen Zusatzinformationen und die Änderungsbedarfe inklusive der verletzten Bedingungen/Regel beinhalten. Die Resultate der Analyse dienen anschließend zur Konkretisierung weiterer Änderungsbedarfe sowie der Definition notwendiger Änderungsmaßnahmen (beispielsweise in iterativer Durchführung mit Modul 2.1 oder Modul 2.2). Somit werden zum Abschluss der Analysemodule 3.1 bis 3.3 die Bereiche „2. Änderungsursache, -bedarf und Zielsetzung der Änderung“ sowie „3. Betroffene Produktionsbereiche und Ansprechpartner“

des Änderungssteckbriefs weiter befüllt.

Unterstützende Werkzeuge

Um die Modellierung zu unterstützen können graphische Modellierungs- und Präsentationswerkzeuge genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde hierfür auf Microsoft-Visio zurückgegriffen und ein Template in dieser Umgebung erstellt.

Ressourcen/Kompetenzen

Für die Durchführung der Module 3.1 bis 3.3 ist eine koordinierende Person – in der Regel der*die für die Analyse zuständige Änderungsmanager*in –, welche*r einen Überblick über die relevanten Bereiche und Stakeholder hat, notwendig. Die*Der Änderungsmanager*in sollte auf die Expert*innen der jeweiligen Bereiche zugehen können, um sowohl eine ganzheitliche Modellierung als auch eine kritische Diskussion der Analyseergebnisse zu ermöglichen.

Vorbereitung

Für die Analyse von Änderungsfortpflanzungen gilt es, die GFM des betrachteten Produktionssystems im Vorfeld zu erstellen. Es wird empfohlen, die Modellierung wie bei einer Wertstromanalyse vor Ort und in mehreren Durchläufen durchzuführen (ERLACH 2010, 54 f.). In einem ersten Schritt werden die Produktionsprozesse (Arbeitsstationen) mit allen Betriebsmitteln, etc. und die verbindenden Materialflüsse aufgenommen. Im zweiten Durchgang liegt der Fokus auf den Geschäftsprozessen zur Auftragsabwicklung und den zugehörigen Informationsflüssen. Dabei werden ebenso die Swimlanes und Informationsflüsse der IT-Systeme betrachtet. Anschließend können die organisatorischen und räumlichen Elemente sowie die weiteren Flussarten (z. B. Medienflüsse der zu versorgenden Infrastruktur) ergänzt werden. Abschließend werden die Zusatzinformationen hinsichtlich Änderungsfortpflanzungen (Modul 3.2) und die zu erfüllenden Bedingungen (Modul 3.3) modelliert und das Gesamtmodell auf dem 2D-Layout des Produktionssystems angeordnet.

5.3.4 Zielsetzung 4: Einfluss der Änderung/en auf Produktionskennzahlen

Zielsetzung und Genauigkeit

Die Analysemodule 4.1 bis 4.6 betrachten die Auswirkungen von Änderungen auf Produktionskennzahlen in unterschiedlichen Genauigkeiten (siehe Abbildung 5.20). Als Kennzahl werden „quantitative Daten, die als bewusste Verdichtung der komplexen Realität über zahlenmäßige erfassbare betriebswirtschaftliche Sachverhalte informieren“ (WEBER & SCHÄFFER 2020, S. 197) verstanden. Sie dienen dementsprechend dazu, durch eine geeignete Informationsverdichtung möglichst schnell und vereinfacht über komplexe Sachverhalte mit einer Vielzahl an Einflussfaktoren zu berichten (GLADEN 2014, S. 10, 2001, S. 12).

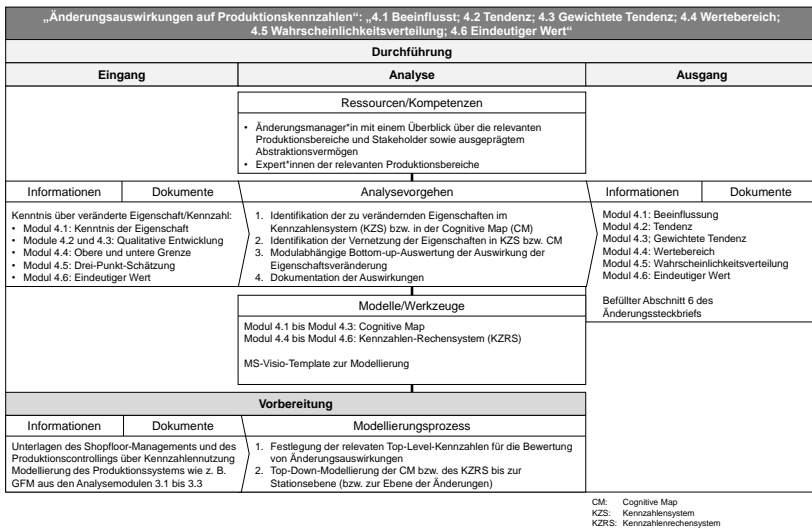


Abbildung 5.20: Analysemodule 4.1 bis 4.6

In der Planung und dem Controlling von Produktionssystemen sind insbesondere Unternehmens-, Flächen-, Personal-, Produktions- und Wertschöpfungskennzahlen von Relevanz (EVERSHEIM & SCHUH 1999, S. 9.34). Ein spezifisch für die Anwendung im Bereich der Produktion entwickeltes Kennzahlensystem – also eine Abbildung der Beziehungen von einzelnen Kennzahlen untereinander (HORVÁTH 2016; PREISLER

2008) – stellt beispielsweise das Wertstromkennzahlensystem dar (GOTTMANN 2016). Dieses basiert auf den Anforderungen von effizienten Produktionssystemen mit einer Fokussierung auf wertschöpfende Tätigkeiten und Kundenorientierung und wurde aus der Wertstrombetrachtungswise eines kompletten Wertschöpfungsprozesses entwickelt (GOTTMANN 2016, S. 157–185) (siehe Abbildung 5.21).

Erfolgsfaktoren – Wertstromprozesse					
Zielkennzahl	Anlieferprozesse	Produktionsprozesse	Logistikprozesse	PPS, Organisation	Kundenprozesse
Kosten pro Einheit	Materialkosten	Produktionskosten	Logistikkosten	Prozesskosten	Transportkosten
Fließgrad	Wiederbeschaffungszeit	Bearbeitungszeit	Liegezeiten/Reichweiten	Losgrößen	Transportzeiten
Termintreue	Abweichung Liefertermin	Abweichung Produktionszeit	Materialverfügbarkeit	Abweichung Lieferzeit	Abweichung Transportzeit
Auslieferqualität	Fehlerquote	Produktionsfehlerquote	Handlingfehlerquote	Falschverbauquote, Bestände	Transportschädenquote
Reaktionsfähigkeit	Wiederbeschaffungszeit	EPEI, OEE	Materialverf. / interne WBZ	Losgrößen	Transportwege
Variantenflexibilität	Variantenflex. Lieferant	Variantenflex. Produktion	Variantenflex. Logistik	Variantenflex. PPS, Organisation	Variantenflex. Transport
Innovationsgrad Wertstrom	Innovationsgrad Anlieferprozess	Innovationsgrad Produktion	Innovationsgrad Logistik	Innovationsgrad Organisation	Innovationsgrad Kundenprozesse

PPS: Produktionsplanung und -steuerung; EPEI: Every Part Every Interval; OEE: Overall Equipment Effectiveness; WBZ: Wiederbeschaffungszeit

Abbildung 5.21: Wertstromkennzahlensystem nach GOTTMANN (2016, S. 163)

Für die Analyse von Änderungsauswirkungen auf die unternehmensindividuelle Auswahl an Kennzahlen kann zwischen sechs Genauigkeiten gewählt werden. Es können die grundsätzliche Beeinflussung (Modul 4.1), eine Tendenz (Modul 4.2) bzw. eine gewichtete Tendenz (Modul 4.3) für die Kennzahlentwicklung, ein Wertebereich (Modul 4.4), eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (Modul 4.5) oder ein eindeutiger Wert (Modul 4.6) für jede Kennzahl bestimmt werden.

Modellierung

Die Systemmodellierung muss es ermöglichen, die zu ändernden Fabrikelemente bzw. deren Eigenschaften mit den Kennzahlen des Produktionssystems zu verknüpfen. Während in den Modulen 4.4 bis 4.6 dabei eine quantitative Abhängigkeit modelliert werden muss, kann in den Modulen 4.1 bis 4.3 eine qualitative Verbindung ausreichend sein.

Eine geeignete Visualisierung soll die Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen gewährleisten.

Um diese Anforderungen zu erfüllen, stellen einerseits das Kennzahlen-Rechensystem und andererseits die Cognitive Map geeignete Modellierungsmethoden für die Analyse von Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen dar (siehe Abbildung 5.22).

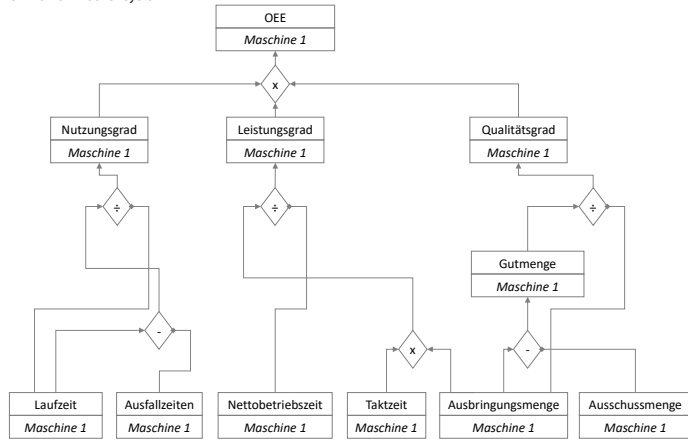
In einem Kennzahlen-Rechensystem werden die Beziehungen zwischen den einzelnen Kennzahlen durch definitionslogische Beziehungen und mathematische Umformungen beschrieben (GLADEN 2014, S. 98). Sie ermöglichen in den Modulen 4.4 bis 4.6 somit eine quantitative Berechnung von Kennzahlen und von ihren Auswirkungen aufeinander. Auf oberster Ebene steht dabei eine aussagefähige Spitzenkennzahl, welche aus Zweigen von Unterkennzahlen bestimmt wird. Auf unterster Ebene des Kennzahlen-Rechensystems dienen im Rahmen dieser Analyse die veränderbaren Eigenschaften der Fabrikelemente. In der Modellierung werden Kennzahlen als Rechtecke mit der Bezeichnung der Kennzahl und der Spezifikation des beschriebenen Produktionselements/-bereichs und die mathematischen Operatoren in Form von Rauten dargestellt.

Insbesondere bei einer Division und einer Subtraktion muss außerdem die korrekte Reihenfolge der mathematischen Formel leicht interpretierbar sein. Deshalb steht bei der Division die von links eingehende Größe im Zähler und die von rechts eingehende Größe im Nenner. Bei der Subtraktion ist die von links eingehende Größe der Minuend und die von rechts eingehende Größe der Subtrahend. Um dies zu verdeutlichen, wird die von rechts eingehende Größe mit einer Raute anstatt eines Pfeils visualisiert. Da bei einer Multiplikation bzw. bei einer Addition die Reihenfolge der Faktoren bzw. der Summanden nicht relevant ist, wird diese Unterscheidung hier nicht vorgenommen⁵.

Sind qualitative Vernetzungen von Kennzahlen für die Analyse ausreichend, kann eine Cognitive Map mit den benötigten Kennzahlen als Knoten zur Informationsgrundlage genutzt werden (siehe Abbildung 5.22). Eine positive Beziehung zwischen zwei

⁵ Neben den vier Grundrechenarten Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division gibt es noch weitere Rechenoperationen wie beispielsweise mathematische Folgen-, Wurzel- sowie Quadratoperatoren. Diese werden ebenfalls entweder ausgeschrieben oder in Form von mathematischen Zeichen in eine Raute gesetzt. Zudem kann es vorkommen, dass eine Kennzahl nicht einfach sondern in einer bestimmten Vielfachheit als Formelbestandteil zur Berechnung einer anderen Kennzahl benötigt wird. Hierfür wird eine Raute, die den entsprechenden Operator mitsamt Zahl enthält, genutzt. Sollten Rechenoperatoren aufgrund ihrer Komplexität oder ihrer Vielzahl an Eingangsoperationen nicht einfach zu notieren sein, können sie zudem auch textlich in der Raute beschrieben werden.

a) Kennzahlen-Rechensystem



b) Cognitive Map

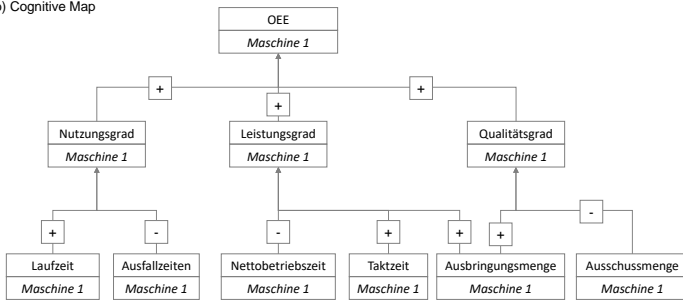


Abbildung 5.22: Kennzahlen-Rechensystem (a) und Cognitive Map (b) der Gesamtanlageneffektivität/Overall Equipment Effectiveness (OEE) einer Arbeitsstation (NAKAJIMA 1990; GOTTMANN 2016)

Kennzahlen A (z. B. Laufzeit Maschine 1) und B (z. B. Nutzungsgrad Maschine 1) wird durch ein „+“ an der jeweiligen Kante gekennzeichnet und bedeutet, dass je größer A ist, desto größer wird B. Eine negative Beziehung, welche durch ein „-“ dargestellt wird, impliziert, dass eine Vergrößerung von Kennzahl A (z. B. Ausfallzeiten Maschine 1) zu einer Verkleinerung von Kennzahl B führt (z. B. Nutzungsgrad Maschine 1). Die Cognitive Map wird für die Analysemodule 4.1 bis 4.3 genutzt, in welchen primär die „Richtung“ einer Änderungsauswirkung auf Produktionskennzahlen bestimmt wird.

Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente

Als Startpunkt der Analyse von Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen dient die Kenntnis einer zu ändernden Eigenschaft auf der untersten Ebene des Kennzahlensystems bzw. der Cognitive Map. In Modul 4.1 ist es ausreichend, die betroffene Eigenschaft identifiziert zu haben. Für die Module 4.2 und 4.3 ist es notwendig zu wissen, ob sich der Wert der Eigenschaft vergrößern oder verringern wird. In Modul 4.4 wird eine obere und eine untere Grenze für die Entwicklung der zu verändernden Eigenschaftswerte festgelegt, während zu Beginn von Modul 4.5 eine Drei-Punkt-Schätzung (siehe Analyseverfahren) für den Eigenschaftswert nach Durchführung der Änderungen abgegeben wird. In Modul 4.6 wird mit einem eindeutigen Wert für die veränderte Eigenschaft gerechnet, wobei dieser bestenfalls auf einem detaillierten Änderungskonzept und somit einer sicheren Information über die Entwicklung der Kennzahlen basiert.

Analyseverfahren

Die Analyse der Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen mit Hilfe der Cognitive Map oder des Kennzahlen-Rechensystems startet mit der Auswahl und modulspezifischen Spezifikation der durch die Änderung direkt beeinflussten Prozessparameter (siehe Abbildung 5.23). Anschließend werden durch die Analyse der Verbindung dieser Parameter im Kennzahlensystem alle beeinträchtigten weiteren Kennzahlen identifiziert. Die Analyse der Auswirkungen auf diese Kennzahlen wird anschließend wiederum modulspezifisch durchgeführt. Die Dokumentation der Analyseergebnisse erfolgt zum Abschluss im Bereich „6. Auswirkungen auf Produktionskennzahlen“ im Änderungssteckbrief aus Abbildung 5.12.

In Analysemodul 4.1 erfolgt in Schritt 1 lediglich die Auswahl der zu verändernden Prozessparameter. Die finalen Ergebnisse des Moduls werden bereits durch die Abhängigkeitsanalyse in Schritt 2 bestimmt und können somit direkt dokumentiert werden.

In den Analysemodulen 4.2 und 4.3 werden in Schritt 1 zusätzlich Tendenzen für die Kennzahlenentwicklung angegeben. Diese werden in Schritt 3 mit Hilfe der Cognitive Map in Richtung der betroffenen Spitzenkennzahlen aggregiert. Dabei ist es möglich, dass eine Kennzahl entgegengesetzten Einflüssen ausgesetzt ist, also sowohl durch eine sinkende als auch eine steigende Tendenz betroffen ist. Am Beispiel der OEE aus Abbildung 5.22 wäre dies für den Qualitätsgrad der Fall, wenn durch eine Änderung sowohl für die Ausbringungs- als auch für die Ausschussmenge ein Anstieg erwartet

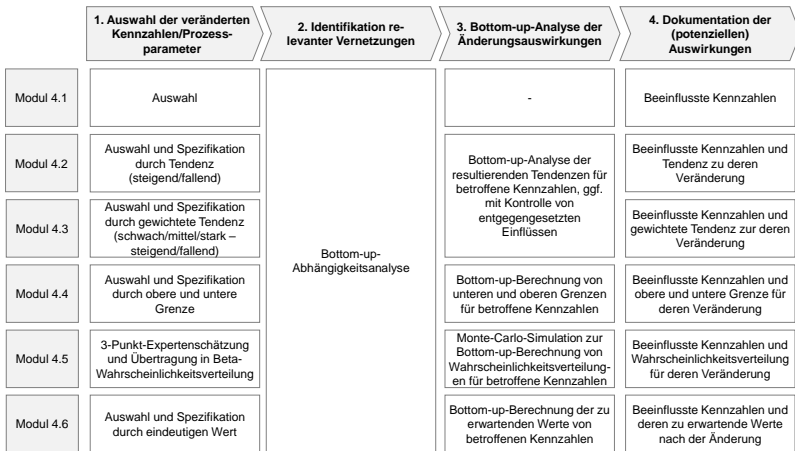


Abbildung 5.23: Modulspezifisches Analyseverfahren zur Bestimmung von Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen

werden würde. In diesen Fällen sollte durch eine kurze manuelle Prüfung abgeschätzt werden, welcher Einfluss stärker ins Gewicht fällt, um eine finale Aussage über die Kennzahlenveränderung zu treffen.

In Analysemodul 4.4 werden in Schritt 1 die oberen und unteren Grenzen der direkten erwarteten Kennzahlenänderungen festgelegt. Anhand des Kennzahlensystems können in Schritt 3 die möglichen Wertebereiche für die weiteren betroffenen Kennzahlen berechnet werden. Dabei ist je nach Abhängigkeit mit der oberen bzw. der unteren Grenze zu rechnen. Für die Bestimmung des höchsten zu erwartenden Wertes für die Spitzenkennzahl werden die obersten Werte aller Kennzahlen mit positivem Einfluss und alle niedrigsten Werte für die Kennzahlen mit einem negativen Einfluss genutzt. Umgekehrt werden zur Berechnung des niedrigsten Wertes einer Spitzenkennzahl alle niedrigsten Grenzen der Kennzahlen mit einem positiven Einfluss und alle obersten Grenzen der Kennzahlen mit einem negativen Einfluss einbezogen.

In Analysemodul 4.5 werden für die zu verändernden Prozessparameter in Schritt 1 die optimistischsten (a), pessimistischsten (b) und wahrscheinlichsten (m) Werte abgefragt, welche anschließend in eine Beta-Wahrscheinlichkeitsverteilung überführt werden (siehe Abbildung 5.24). Dieses Vorgehen wurde im Kontext der PERT-Analyse eingeführt und bereits von PLEHN (2017) für die Analyse von Änderungsauswirkungen genutzt.

Die Analyse von Wahrscheinlichkeitsverteilungen bietet den Vorteil gegenüber Ober- und Untergrenzen, dass nicht nur die Ausreißer sondern auch die wahrscheinlichsten und unwahrscheinlichsten Werte sichtbar sind. Zudem ermöglicht sie eine bessere Risikoanalyse, indem beispielsweise betrachtet werden kann, wie plausibel das Eintreten eines Kennzahlenwertes über oder unter einem gewissen Grenzwert ist.

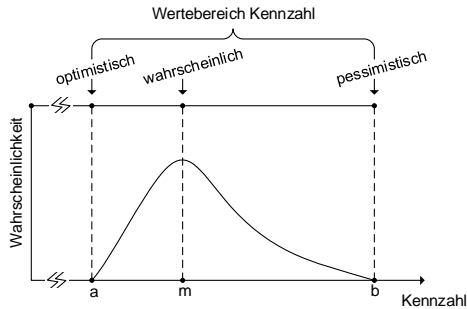


Abbildung 5.24: PERT-Beta-Verteilung in Anlehnung an MALCOLM ET AL. (1959) und PLEHN (2017)

Die Beta-Verteilung der Kennzahlen lässt sich dabei als Wahrscheinlichkeitsdichte $f(x; \alpha, \beta)$ definieren:

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)} \quad (5.1)$$

Dabei steht (x) für eine zufällige Variable als Element des Intervalls $[a, b]$. α und β sind Formparameter der Verteilung und $B(\alpha, \beta)$ ist ein Vorfaktor für die korrekte Normierung.

Die Formparameter können aus den angegebenen Werten für a , b und c wie folgt bestimmt werden (DAVIS 2008; PLEHN 2017):

$$\alpha = \frac{2}{3} * \frac{b+4m-5a}{b-a} \left(1 + \frac{4(m-a)(b-m)}{(b-a)^2} \right) \quad (5.2)$$

$$\beta = \frac{2}{3} * \frac{5b-4m-a}{b-a} \left(1 + \frac{4(m-a)(b-m)}{(b-a)^2} \right) \quad (5.3)$$

Zur Bottom-up-Berechnung der Änderungsauswirkungen dient in Schritt 3 eine Monte-Carlo-Simulation, durch welche eine Abschätzung eines Funktionswerts durch wiederholte Auswahl zufällig verteilter Größen getroffen werden kann⁶. So ergeben sich als Ergebnis Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Werte der betroffenen Kennzahlen.

In Analysemodul 4.6 werden in Schritt 1 eindeutige erwartete Werte für die Kennzahländerungen festgelegt. Anhand dieses Inputs können die Werte für die betroffenen Kennzahlen Bottom-Up entlang des Kennzahlen-Rechensystems bestimmt werden. Da in diesem Fall keine Toleranzen oder mögliche Abweichungen der Analyseergebnisse von der final eintretenden Situation nach der Änderung abgebildet werden, sollte das Analysemodul 4.6 primär dann genutzt werden, wenn detaillierte Informationen wie beispielsweise Lieferantenangebote inkl. technischen Beschreibungen oder Simulationen von der geplanten Änderung vorliegen.

Unterstützende Werkzeuge

Um die Modellierung der Cognitive Map sowie des Kennzahlensystems zu unterstützen wurde eine Microsoft-Visio-Vorlage erstellt, wobei grundsätzlich jegliche graphische Modellierungs- und Präsentationswerkzeuge unterstützen können. Für die Berechnung mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Analysemodul 4.5 und die Monte-Carlo-Simulation können kommerzielle Programme wie beispielsweise Oracle Crystal Ball genutzt werden.

Ressourcen/Kompetenzen

Für die Durchführung der Module 4.1 bis 4.6 ist eine koordinierende Person – in der Regel der*die für die Analyse zuständige Änderungsmanager*in –, welche*r einen Überblick über die relevanten Bereiche und Stakeholder hat, notwendig. Die*Der Änderungsmanager*in sollte auf die Expert*innen der jeweiligen Bereiche zugehen können, um sowohl eine ganzheitliche Modellierung als auch eine kritische Diskussion der Analyseergebnisse zu ermöglichen. Des Weiteren sollten die in den unterstützenden Werkzeugen genannten Softwareprogramme zur Verfügung stehen.

⁶ Ausführliche Erklärungen zur Funktionsweise einer Monte-Carlo-Simulation, ihren Grenzen sowie Anwendungsbeispiele finden sich unter anderem in BRONŠTEJN ET AL. (2008, 848 ff.) oder RUBINSTEIN & KROESE (2017).

Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Analysemodule gilt es, die Cognitive Map oder das Kennzahlen-Rechensystem zu erstellen. Hierfür wird ein Top-Down-Verfahren empfohlen, um die Zielsetzung einer bedarfsorientierten Analyse zu berücksichtigen. Dementsprechend werden zunächst die Spitzenkennzahlen, auf welche der Einfluss der Änderungen bestimmt werden soll, gewählt. Ausgehend hiervon erfolgt eine schrittweise Top-Down-Modellierung der Abhängigkeiten bis hin zu den direkt änderbaren Eigenschaften auf der Stationsebene des Produktionssystems.

5.3.5 Zielsetzungen 5 und 6: Änderungskosten und Änderungsaufwand sowie Umsetzungsdauer

Aufgrund der starken Ähnlichkeit im Analyseverfahren sowie der Modellierung werden die Zielsetzungen Änderungskosten, Änderungsaufwand und Umsetzungsdauer im Folgenden gemeinsam beschrieben. Abbildung 5.25 zeigt die Module 5.1 bis 5.3 zur Bewertung von Änderungskosten und -aufwänden, während Abbildung 5.26 die Module 6.1 bis 6.3 zur Analyse der Änderungsdauer darstellt.

„Änderungskosten (€) und Änderungsaufwand (Std.)“: „5.1 Wertebereich; 5.2 Wahrscheinlichkeitsverteilung; 5.3 eindeutiger Wert“					
Durchführung					
Eingang		Analyse		Ausgang	
		Ressourcen/Kompetenzen <ul style="list-style-type: none"> • Änderungsmanager*in mit einem Überblick über die relevanten Produktionsbereiche und Stakeholder sowie ausgeprägtem Abstraktionsvermögen • Expert*innen der relevanten Produktionsbereiche 			
Informationen	Dokumente	Analyseverfahren		Informationen	Dokumente
Liste der Gesamtheit der zu bewertenden Änderungsmaßnahmen		<ol style="list-style-type: none"> 1. Angabe der Umsetzungskosten und -aufwände in der gewünschten Genauigkeit für jeden relevanten Schritt im Änderungsmanagement-Prozess 2. Kalkulation der Gesamtkosten und -aufwände 3. Dokumentation der Auswirkungen 		Modul 5.1: Wertebereich Modul 5.2: Wahrscheinlichkeitsverteilung Modul 5.3: eindeutiger Wert Befüllter Abschnitt 5 des Änderungssteckbriefs	
		Modelle/Werkzeuge <p>Kostenstruktur zur Bewertung der Umsetzungskosten und -aufwände der einzelnen Schritte des Änderungsmanagement-Prozesses und automatisierten Berechnung der Gesamtkosten/-aufwände</p>			
Vorbereitung					
Informationen		Dokumente		Modellierungsprozess	
<ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation des Änderungsmanagement-Prozesses des Unternehmens • Ggf. Daten/Informationen über die Kosten und Aufwände der Prozessschritte bei vergangenen Änderungen • Stundensätze der am Änderungsprozess beteiligten Mitarbeitendengruppen 		<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl der relevanten Schritte des Änderungsmanagement-Prozesses in der Kostenstruktur zur Bewertung der Kosten und Aufwände • Ggf. Ergänzung von individuellen Schritten/Tätigkeiten 			

Abbildung 5.25: Analysemodule 5.1 bis 5.3

Zielsetzung und Genauigkeit

Die Analysemodule 5.1 bis 5.3 verfolgen das Ziel, die Kosten sowie den Zeitaufwand – also die notwendige Arbeitszeit der Mitarbeitenden – für die Umsetzung der Änderung(en) zu bestimmen. Die Änderungsdauer, welche in den Analysemodulen 6.1 bis 6.3 betrachtet wird, bezieht sich ergänzend hierzu auf den Zeitraum, welcher für das Durchlaufen des Änderungsmanagement-Prozesses im Anschluss an die Auswirkungsanalyse benötigt wird.

Für beide Zielgrößen können die Ergebnisse entweder als Wertebereich (Module 5.1 und 6.1), Wahrscheinlichkeitsverteilung (Module 5.2 und 6.2) oder eindeutiger Wert (Module 5.3 und 6.3) ermittelt werden.

„Umsetzungsdauer (Tage)“: „6.1 Wertebereich; 6.2 Wahrscheinlichkeitsverteilung; 6.3 eindeutiger Wert“					
Durchführung					
Eingang		Analyse		Ausgang	
		Ressourcen/Kompetenzen • Änderungsmanager*in mit einem Überblick über die relevanten Produktionsbereiche und Stakeholder sowie ausgeprägtem Abstraktionsvermögen • Expert*innen der relevanten Produktionsbereiche			
Informationen	Dokumente	Analyseverfahren 1. Angabe der Umsetzungsdauer in der gewünschten Genauigkeit für jeden relevanten Schritt im Änderungsmanagement-Prozess 2. Kalkulation der Gesamtdauer 3. Dokumentation der Auswirkungen		Informationen	Dokumente
Liste der Gesamtheit der zu bewertenden Änderungsmaßnahmen				Modul 6.1: Wertebereich Modul 6.2: Wahrscheinlichkeitsverteilung Modul 6.3: eindeutiger Wert Befüllter Abschnitt 5 des Änderungssteckbriefs	
		Modelle/Werkzeuge Excel-Tool zur Bewertung der Umsetzungsdauer der einzelnen Schritte des Änderungsmanagement-Prozesses und automatisierten Berechnung der Gesamtdauer			
Vorbereitung					
Informationen	Dokumente	Modellierungsprozess • Auswahl der relevanten Schritte des Änderungsmanagement-Prozesses zur Bewertung der Umsetzungsdauer • Ggf. Ergänzung von individuellen Schritten/Tätigkeiten			
• Dokumentation des Änderungsmanagement-Prozesses des Unternehmens • Ggf. Daten/Informationen über die Dauer der Prozessschritte bei vergangenen Änderungen					

Abbildung 5.26: Analysemodule 6.1 bis 6.3

Modellierung

Zur Unterstützung der Analysemodule 5.1 bis 5.3 dient eine Listendarstellung der potenziellen Kosten- und Aufwandspositionen der einzelnen Phasen des Änderungsmanagement-Prozesses. Anhand dieser Übersicht können die Kosten und Aufwände für jeden Schritt bzw. jede Position in der gewählten Genauigkeit festgelegt und anschließend aggregiert werden. Als initiales Referenzmodell wurde auf Basis von Literatur und Experteninterviews eine Kostenstruktur für

das Änderungsmanagement erarbeitet, welche die ermittelten Positionen in die Phasen des Änderungsmanagement-Prozesses nach RÖSSING (2007) gliedert (siehe Abbildung 5.27).

Für die Analysemodule 6.1 bis 6.3 wird analog hierzu eine Listendarstellung der Schritte des individuellen Änderungsmanagement-Prozesses genutzt, um die zu erwartende Dauer für jede Aktivität zu bestimmen. Sollte kein unternehmensinterner Änderungsprozess vorliegen, können die Prozesse von KOCH (2017) und RÖSSING (2007) als Referenz für die durchzuführenden Schritte zur Änderungsumsetzung dienen.

Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente

Zur Analyse von Änderungskosten, -aufwänden und -dauer ist es notwendig, dass die durchzuführenden Maßnahmen bekannt sind. Je detaillierter diese bereits beschrieben sind, desto genauer bzw. einfacher kann die Analyse erfolgen.

Analyseverfahren

Die Analyse der Kosten, Aufwände und Dauer der Änderung(en) wird expertenbasiert mit Hilfe der Kostenstruktur bzw. der Schritte des Änderungsmanagements vorgenommen. Zunächst wird die jeweilige Zielgröße für jede einzelne Listenposition in der gewünschten Genauigkeit abgeschätzt (Schritt 1). Anschließend erfolgt die Berechnung der Gesamtwerte (Schritt 2). Für die Analyse der Änderungskosten werden dabei die ermittelten Personalaufwände anhand von vorher festgelegten Kostensätzen berücksichtigt. Die abschließende Dokumentation der Analyseergebnisse erfolgt im Bereich „5. Notwendige Maßnahmen im Falle einer Umsetzung“ des Änderungssteckbriefs aus Abbildung 5.12 (Schritt 3).

In den Analysemodulen 5.1 und 6.1 werden für Kosten, Aufwände und Dauer jeweils Unter- und Obergrenzen für die zu erwartenden Werte pro Position/Aktivität abgeschätzt. In der Berechnung der Gesamtwerte werden anschließend alle Untergrenzen zu einem niedrigsten Wert und alle Obergrenzen zu einen Höchstwert für die zu erwartenden Änderungsauswirkungen aufsummiert.

Zur Ermittlung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Auswirkungsanalyse wird in den Analysemodulen 5.2 und 6.2, wie bereits im Analysemodul 4.5 erläutert (siehe Abschnitt 5.3.4), die Methode der Dreipunktschätzung und die Umwandlung der

1. Initiierung der Änderung	<p>1.1. Änderungsbedarf erkennen</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten der Vorüberlegung <input type="checkbox"/> Kosten für Scharmaßnahmen 	<p>1.2. Analyse des Änderungsbedarfs</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten der Begleitung der Änderungswirkungsanalyse <input type="checkbox"/> Kosten für die Sammlung von Daten für die Änderungswirkungsanalyse <input type="checkbox"/> Kosten für einen vorgelagerten Proof-of-Concept für mögliche Lösungsansätze 	<p>1.3. Änderung formulieren</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten der Formulierung des Änderungsantrags <input type="checkbox"/> Kosten für zeitlich begrenztes Abstimmensumfeld bei der Formulierung <input type="checkbox"/> Kosten der Dokumentation des Änderungsantrags <input type="checkbox"/> Kosten der Implementierung und Pflege einer IT-Tode mit Änderungsworklow <input type="checkbox"/> Kosten der Vorfälligkeit des Änderungsantrags durch einen Führungsstil
2. Durchführung der Änderung	<p>2.1. Lösungsalternativen generieren</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten der technischen Ausgestaltung <input type="checkbox"/> Kosten notwendiger Prototypen <input type="checkbox"/> Versuchskosten, Versuchs-Simulation & Validierung nötig? <input type="checkbox"/> Produkttestkosten nötig? <input type="checkbox"/> Ja/ Lagerkosten Sportflieger <input type="checkbox"/> Kosten erneuerter Rückgänge <input type="checkbox"/> Kosten blockierter Maschinen <input type="checkbox"/> Zusatzkosten in der Fertigungssteuerung <input type="checkbox"/> Zusatzkosten für die Probefahrten bei Versuchen – Produktivitätsverluste <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Kosten durch die Nutzung von Versuchsalternativen <input type="checkbox"/> Kosten durch die externe Absicherung (z.B. Tiv) von Versuchsergebnissen <input type="checkbox"/> Kosten der Aufbereitung einer Entscheidungsvorlage <input type="checkbox"/> Kosten der Prüfung und Genehmigung durch das Management 	<p>2.2. Änderungsablauf planen</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten der Änderungsplanung <input type="checkbox"/> Kosten durch die Erstellung von Zeitplänen etc. <input type="checkbox"/> Kosten durch Ausschreibung von Fremdleistungen & Einholen von Angeboten <input type="checkbox"/> Kosten durch Zielverluste im Änderungsablauf <input type="checkbox"/> Verzögerte empfangene Zusatzerträge am Markt <input type="checkbox"/> Kosten der Informationsaufnahme des Änderungsantrags <input type="checkbox"/> Kosten der Information aller Betroffenen <input type="checkbox"/> Kosten der Erstellung & Verteilung der Änderungsaufträge <input type="checkbox"/> Kosten der Information von Ziellieferern <input type="checkbox"/> Kosten der Eintragung in Änderungsaufträge <input type="checkbox"/> Kosten der Information von Kunden <input type="checkbox"/> Kosten durch Rückfragebedarf <input type="checkbox"/> Kosten von Vertragsänderungen <input type="checkbox"/> Kosten durch die Beteiligung von Einkaufs- und Rechtsabteilung 	<p>2.3. Änderung umsetzen</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Erneuter Produktionsauftrag nötig? <input type="checkbox"/> Ja/ Kosten durch antragsbedingte Produktivitätsverluste <input type="checkbox"/> Kosten durch antragsbedingte Ausschuss <input type="checkbox"/> Kosten durch antragsbedingte Personals <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Kosten durch Steuerung & Überwachung der Änderungsdurchführung <input type="checkbox"/> Kosten der Einstellung der Änderungsmaßnahmen in die Produktion <input type="checkbox"/> Sportplatzkosten während der Änderungsdurchführung <input type="checkbox"/> Kosten durch die Aktualisierung von Datenbanken <input type="checkbox"/> Kosten durch die Ächtung von Produkt- & Produktionssoftware <input type="checkbox"/> Kosten durch Fehler und Folgefehler bei der Änderung von Software <input type="checkbox"/> Kosten durch das Ändern von Sekundärdokumenten (Zeichnungen, Stücklisten) <input type="checkbox"/> Kosten durch die Ächtung technischer Sekundärdokumente (Arbeitspläne etc.) <input type="checkbox"/> Kosten für die Um-Neuverteilung von Medienbibliotheken und Produktionsinfrastruktur <input type="checkbox"/> Kosten durch nötige Überstunden/Schichtzulagen oder Mehrbedarf an MA <input type="checkbox"/> Kosten durch Anschaffungspassung von Betriebsmitteln/Werkzeugen <input type="checkbox"/> Kosten durch Neu-Zulassung von Gefahrenstoffen und für neue Sicherheitsabgaben etc. <input type="checkbox"/> Kosten für die Erstumsteuerung nach der Änderungsumsetzung
3. Nachbereitung der Änderung	<p>3.1. Ergebnisse stabilisieren</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Altsatz vorhanden? <input type="checkbox"/> Ja/ Kosten der Nacharbeit <input type="checkbox"/> Verschuldungskosten <input type="checkbox"/> Nein <input type="checkbox"/> Kosten für die Aktualisierung von Unternehmensstandards und Folgekosten davon <input type="checkbox"/> Kosten antragsbezogener Fehler & Folgefehler <input type="checkbox"/> Zusätzliche laufende Kosten auf Grund der Änderung <input type="checkbox"/> Zusätzliche Fixe- und Wartungskosten in der Produktion <input type="checkbox"/> Kosten der Verwaltung neuer Versionen und Varianten <input type="checkbox"/> Kosten für neue Messmittel und Kalibrierungen <input type="checkbox"/> Kosten für die betriebliche Neuzulassung von Produkten und/oder Produktionsressourcen <input type="checkbox"/> Kosten durch Produktivitätsverluste <input type="checkbox"/> Kosten durch empfangenen Gewinn am Markt 	<p>3.2. Änderungsantrag bewerten</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten durch Zielverluste in der Änderungsdurchführung <input type="checkbox"/> Zusätzliche laufende Kosten aufgrund der Änderung <input type="checkbox"/> Zusätzliche Fixe- und Wartungskosten in der Produktion <input type="checkbox"/> Kosten der Verwaltung neuer Versionen und Varianten 	<p>3.3. Erfahrungen sichern</p> <ul style="list-style-type: none"> <input type="checkbox"/> Kosten durch die Auswertung, Speicherung bzw. Verichtung aller Dokumente

Abbildung 5.27: Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungen in der Produktion in Anlehnung an KRÖGER ET AL. (2019)

Expertenbefragung in eine Beta-Wahrscheinlichkeitsverteilung genutzt⁷. Durch die Summierung jeweils aller wahrscheinlichsten (m), pessimistischsten (b) und optimistischsten Werte (a) werden die Gesamtwerte für a , b und m bestimmt. Diese werden abschließend zur Berechnung der Beta-Wahrscheinlichkeitsverteilung genutzt.

In den Analysemodulen 5.3 und 6.3 werden in Schritt 1 eindeutige erwartete Werte für die Änderungskosten, -aufwände und -dauer festgelegt. Durch die Summierung der Schätzungen werden die Gesamtwerte in Schritt 2 ermittelt. Da in diesem Fall wiederum keine Toleranzen oder mögliche Abweichungen der Analyseergebnisse von der final eintretenden Situation nach der Änderung abgebildet werden, sollten diese Optionen primär dann genutzt werden, wenn detaillierte Informationen über die geplanten Änderungsmaßnahmen vorliegen.

Unterstützende Werkzeuge

Zur Erstellung der Listen von Kosten- und Aufwandspositionen sowie der Schritte des Änderungsmanagement-Prozesses stehen je ein Excel-Tool (siehe Abbildung 5.28), welche initial die literatur- und expertenbasierten Referenzlisten enthalten, zur Verfügung. Die Berechnung der Gesamtwerte (Schritt 2) der Analysemodule kann ebenso durch die Nutzung der dieser Tools automatisiert erfolgen, wobei im Allgemeinen Tabellenkalkulationsprogramme für die Unterstützung der Analysemodule geeignet sind.

Ressourcen/Kompetenzen

Für die Durchführung der Module ist eine koordinierende Person – in der Regel der*die für die Analyse zuständige Änderungsmanager*in –, welche*r einen Überblick über die relevanten Bereiche und Stakeholder hat, notwendig. Die*Der Änderungsmanager*in sollte auf die Expert*innen der jeweiligen Bereich zugehen können, um sowohl eine ganzheitliche Modellierung und Auswirkungsanalyse als auch eine kritische Diskussion der Analyseergebnisse zu ermöglichen.

Vorbereitung

Zur Vorbereitung der Analysemodule gilt es, die Listen der Excel-Tools initial mit den individuellen relevanten Positionen zu befüllen. Für die Analysemodule 5.1 bis 5.3 sind

⁷ Die Vorgehensweise und Berechnungen sind in Abschnitt 5.3.4 beschrieben.

zudem die Kostensätze für die beteiligten Personengruppen zu hinterlegen. Als Grundlage sollte insbesondere eine Dokumentation des individuellen Änderungsmanagement-Prozesses vorhanden sein.

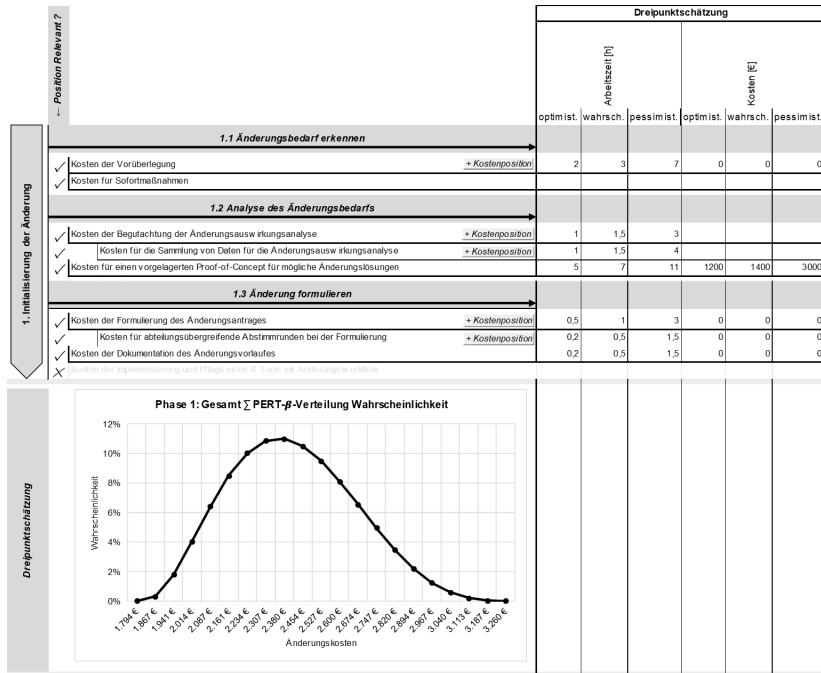


Abbildung 5.28: Auszug aus dem Excel-Tool zur Bewertung von Änderungskosten und -aufwänden – Beispielhafte Ansicht im Modus Dreipunktschätzung (Analysemodul 5.2)

5.3.6 Erhöhung von Ergebnisgenauigkeiten mittels Expertenworkshops

Das Modul „Expertenworkshop“ (siehe Abbildung 5.29) dient als nicht automatisierte Ergänzung, primär zur Kontrolle und Erhöhung der Genauigkeit der teilautomatisiert bestimmten Analyseergebnisse aus den Analysemodulen der Zielsetzungen 1, 3 und 4.

5 Modulare Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

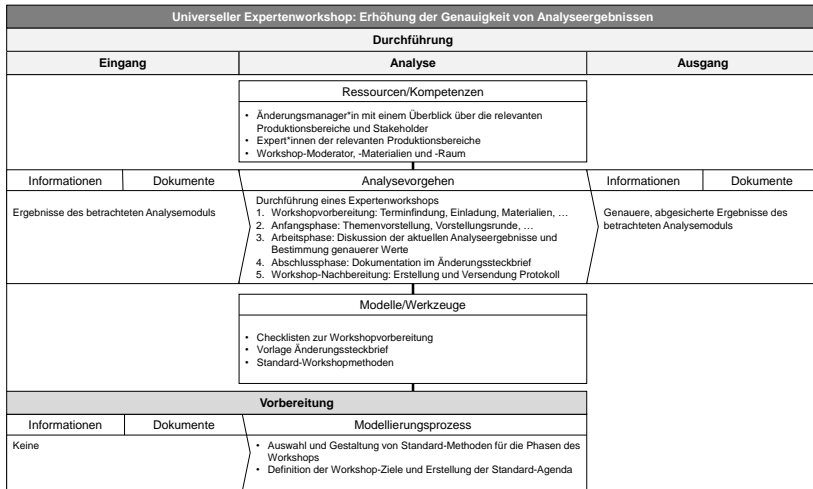


Abbildung 5.29: Analysemodul 7

Besonders bei niedrigen Änderungsfrequenzen oder umfangreichen Produktionssystemen kann der Fall auftreten, dass eine detaillierte Modellierung, wie sie vor allem für die automatisierte Erzielung hoher Ergebnisgenauigkeit in den Modulen der Zielsetzungen 1, 3 und 4 notwendig ist, nicht sinnvoll durchführbar ist. In diesem Fall kann für die Erreichung genauerer Resultate die Kombination aus einer einfacheren Modellierung mit einem Expertenworkshop geeignet sein.

Die Modulinhalt *Zielsetzung und Genauigkeit, Modellierung* und *Notwendige Eingangsinformationen/-dokumente* hängen dementsprechend stark von der Einbindung des Moduls in den Gesamtprozess der Analyse ab, wobei sie aus der übergeordneten Zielsetzung sowie dem gewählten Automatisierungsgrad abgeleitet werden können.

Analyseverfahren

Der Workshop erfolgt analog zu dem Ablauf der Module 2.1 und 2.2. Dementsprechend beinhaltet das Analysemodul die Workshop-Vorbereitung, die Workshop-Durchführung – mit der Anfangsphase, der Arbeitsphase und der Abschlussphase – und die Workshop-Nachbereitung (siehe Abschnitt 5.3.2).

Die Arbeitsphase des Problemlöseworkshops umfasst in Modul 7 die Diskussion der bisherigen Analyseergebnisse sowie die Detaillierung der Analyse in Richtung der angestrebten Ergebnissenauigkeit. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt in dem relevanten Bereich des Änderungssteckbriefs (siehe Abbildung 5.12).

Unterstützende Werkzeuge

Als unterstützende Werkzeuge stehen für eine Workshop-Durchführung sowohl Online als auch in Form von Büchern eine Vielzahl an Checklisten und Leitfäden zur Verfügung (siehe unter anderem BEERMANN ET AL. (2015) oder LIENHART (2015)). Wie in Abschnitt 5.3.2 erläutert, müssen diese für die Anwendung im Rahmen der Analyse von Änderungsauswirkungen nicht speziell angepasst werden, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter spezifiziert werden.

Ressourcen/Kompetenzen

Für die erfolgreiche Durchführung des Workshops werden die jeweiligen Expert*innen der betroffenen Bereiche benötigt. Zur Leitung des Termins sollte der*die Änderungsmanager*in als hauptverantwortliche Person idealerweise Moderationserfahrung aufweisen und auf umfangreiches Moderationsmaterial und geeignete Räumlichkeiten zugreifen können.

Vorbereitung

Alle Schritte der Workshop-Vorbereitung, -Durchführung und -Nachbereitung sind in Modul 7 durchzuführen. Einmalige Vorbereitungen betreffen die Auswahl und Gestaltung von Standard-Methoden für die einzelnen Phasen des Workshops. So kann eine einfache Wiederholbarkeit und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mehrerer Durchführungen ermöglicht werden. Des Weiteren werden die Workshop-Ziele und die Standard-Agenda bereits in der Vorbereitung festgelegt.

6 Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Für die Konfiguration des fallspezifischen Analysevorgehens auf Basis der beschriebenen Module gilt es, die Anwendenden methodisch zu unterstützen. Dabei ist das primäre Ziel, dass der Fokus der Nutzenden auf der Festlegung der eigenen Zielsetzung sowie der Analyse der individuellen Ausgangssituation liegt. Kenntnisse über die Gesamtheit der möglichen Analysemethoden als auch der Module und deren Zusammenhänge soll zur Durchführung des Konfigurationsprozesses nur begrenzt benötigt werden. Die Auswahl und Verknüpfung der benötigten Module soll mit den Zielen und Rahmenbedingungen auf Basis einer klaren Logik, welche die möglichen Zusammensetzungen der Analysemodule definiert, erfolgen. Im Folgenden werden zunächst die Modulvernetzung und die Logik zur Kombination der Module erläutert (siehe Abschnitt 6.1), bevor im Weiteren die Methode zur Erstellung eines fallspezifischen Analysevorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion beschrieben wird (siehe Abschnitt 6.2).

6.1 Zusammenhang der Module

Um den Gestaltungsspielraum des Process Tailoring für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion festzulegen, werden im Folgenden die Zusammenhänge und Konfigurationsmöglichkeiten der Analysemodule aufgezeigt (siehe Abbildung 6.1).

Während die Analysemodule der Zielsetzungen 1 bis 3 zur Bestimmung der notwendigen Änderungsmaßnahmen dienen, beschäftigen sich die Zielsetzungen 4 bis 6 mit der Bewertung der Änderungen. Das Modul 7 ist universell nutzbar und kann für die Erhöhung der Ergebnisgenauigkeit von automatisierten Schritten zum Einsatz kommen. Dies ist der Fall, wenn eine detaillierte Modellierung für eine komplett automatisierte

6 Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

Analyse in der gewünschten Genauigkeitsstufe nicht möglich ist, das Ergebnis für die weitere Analyse aber in der höheren Genauigkeit benötigt wird.

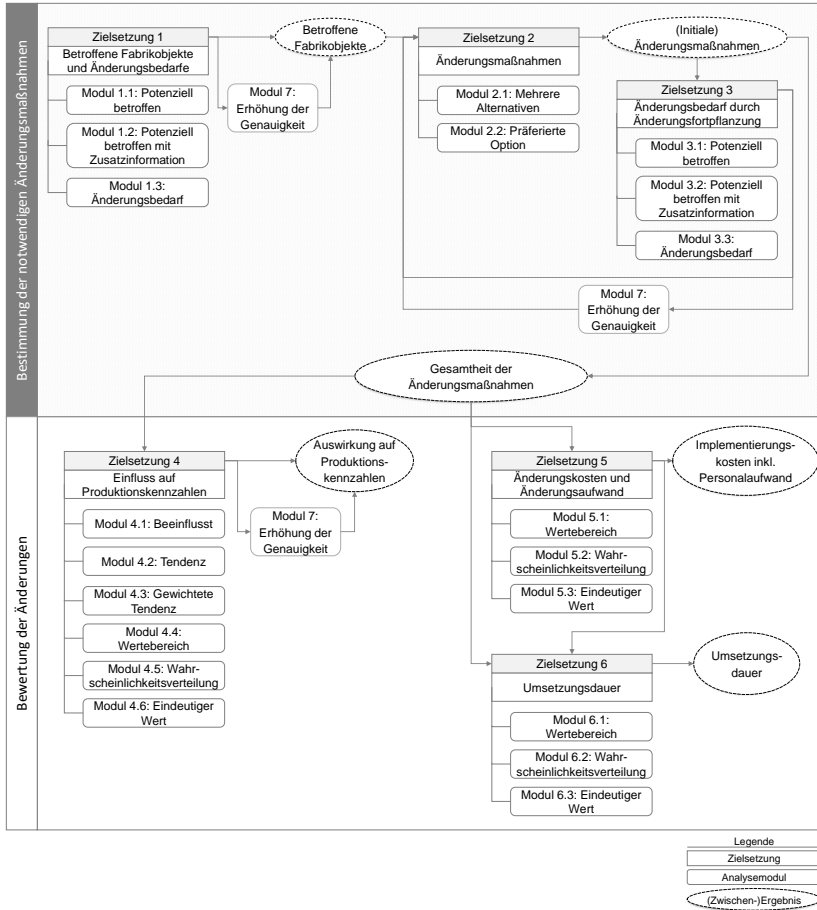


Abbildung 6.1: Konfigurationslogik für die Gestaltung der Änderungsauswirkungsanalyse

Die Zwischenergebnisse (wie z. B. die betroffenen Fabrikobjekte), welche die einzelnen Analysemodul miteinander verbinden, können ebenso als Information von außerhalb der Auswirkungsanalyse („extern“) bereitgestellt werden. Dies ist notwendig, wenn ein Analysemodul bei der Konfiguration nicht ausgewählt wurde und der individualisierte

Prozess die Zwischenergebnisse somit nicht erzeugt.

Durch die Bereitstellung von „externen“ Zwischenergebnissen können alle Module unabhängig voneinander genutzt werden.

6.2 Aufbau und Ablauf der Methodik

Die Methodik zur Konfiguration und Vorbereitung der individuellen Analyse umfasst vier sequenzielle Schritte (siehe Abbildung 6.2), um auf Basis der Konfigurationslogik aus Abbildung 6.1 ein Vorgehen für eine fallspezifische Auswirkungsanalyse zu gestalten.

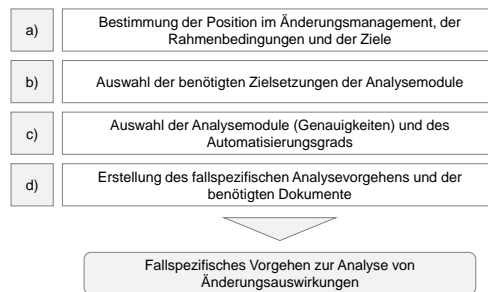


Abbildung 6.2: Vorgehensweise zur Erstellung der fallspezifischen Analyse von Änderungsauswirkungen

Zunächst werden die Einordnung der Analyse in den unternehmensspezifischen Änderungsprozess, die Festlegung der Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls und die Definition der übergeordneten Ziele vorgenommen (a). Basierend auf diesen Ergebnissen werden die benötigten Zielsetzungen der Analysemodule ausgewählt (b). Die Spezifizierung der benötigten Genauigkeit der Ergebnisse sowie die Auswahl des Automatisierungsgrades der automatisierbaren Module ermöglichen die finale Modulauswahl und Prozesskonfiguration (c). Abschließend werden die Schritte der Vorbereitung jedes gewählten Analysemoduls ausgeführt (d), bevor der individuelle Analyseprozess fertiggestellt ist und durchgeführt werden kann.

6.2.1 Bestimmung der Position im Änderungsmanagement, der Rahmenbedingungen und der Ziele

Anhand der Einordnung der Auswirkungsanalyse in das Änderungsmanagement können einerseits die zuvor abgeschlossenen Schritte und die somit bereits zur Verfügung stehenden Informationen identifiziert und dokumentiert werden. Andererseits ergeben sich aus den noch durchzuführenden Aktivitäten die für den weiteren Prozess benötigten Informationen. Zudem stellt dies die Grundlage für eine erfolgreiche Integration der erstellten Analysemethode in den Gesamtprozess des Änderungsmanagements dar. Die Erkenntnisse aus dieser Einordnung fließen in die Analyse der Rahmenbedingungen und der Ziele der Analyse ein.

Die Betrachtung der Rahmenbedingungen berücksichtigt unter anderem unternehmens- bzw. systembezogene Umstände (z. B. die Komplexität des Produktionssystems oder die Verfügbarkeit von Expert*innen), prozessbezogene Aspekte (z. B. verfügbare Informationen aus Änderungsmanagement) sowie änderungs- bzw. anwendungsfallbezogene Gegebenheiten (z. B. die verfügbare Zeit für die Analyse oder die Häufigkeit von Änderungen/Änderungsbedarfen). Zur Festlegung der Rahmenbedingungen sollten die in Tabelle 6.1 gelisteten Fragen beantwortet werden.

Auf Basis der Antworten können anschließend die Ziele der Analyse definiert werden. Dabei fällt insbesondere der Informationsbedarf für die darauffolgenden Schritte des Änderungsmanagements ins Gewicht. Die Ziele werden an dieser Stelle zunächst frei formuliert und erst in den nächsten Schritten (b) und (c) in die Analysemodule und deren Ergebnisse übersetzt. Beispielweise könnte ein Zielformulierung lauten: *„Es sollen möglichst schnell die ungefähren Kosten der notwendigen Änderungen bestimmt werden, damit das Budget eingeplant werden kann. Dabei soll auch der Personalaufwand für die Planung und Durchführung in Form von Personentagen berücksichtigt werden und für eine grobe Ressourcenplanung ausreichend sein.“*

6.2.2 Auswahl der benötigten Zielsetzungen der Analysemodule

Die Ergebnisse aus Schritt (a) dienen anschließend als Basis für die Auswahl der benötigten Zielsetzungen der Analysemodule (b), wodurch die übergeordneten Bereiche,

Tabelle 6.1: Fragen zur Festlegung der Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls

Frage	Beispielhafte Antworten
Unternehmens-/Systembezogene Umstände	
Kann das betrachtete System von einzelnen Expert*innen vollumfänglich verstanden werden oder ist für eine ganzheitliche Analyse eine Abstimmung mit einer Vielzahl an Expert*innen notwendig?	<i>Um eine ganzheitliche Analyse des Systems durchzuführen, sind in etwa drei bis fünf Expert*innen der Kernbereiche Arbeitsvorbereitung, Logistik, Produktionsplanung und IT notwendig.</i>
Sind die notwendigen Expert*innen für die Analyse der Änderungen einfach, verlässlich und am besten simultan verfügbar?	<i>Nein, Expert*innen sind zeitlich nur schwer regelmäßig verfügbar.</i>
Welche Modelle/Prozessdokumentationen liegen über das System vor?	<i>Wertstromanalyse des betrachteten Bereichs, 2D-Layout-Zeichnung der Fabrikhalle</i>
Welche Schritte folgen im Änderungsmanagementprozess der Analyse der Änderungsauswirkungen?	<i>Budgetplanung, Ressourcenplanung, Änderungsdurchführung</i>
Welche Informationen müssen für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Schritte vorliegen?	<i>Liste der notwendigen Änderungen, Änderungskosten, Personalaufwand</i>
Prozessbezogene Aspekte	
Welche Schritte des Änderungsmanagementprozesses wurden bereits vor der Analyse durchgeführt?	<i>Analyse der Änderungsursache und Stakeholderanalyse</i>
Was ist über die Änderung somit schon bekannt?	<i>Ausgefüllter Änderungsantrag mit einer Beschreibung der Änderungsursache und den wichtigsten Stakeholdern</i>
Anwendungsfallbezogene Gegebenheiten	
Wie häufig müssen Änderungen analysiert werden?	<i>zwei Änderungsanträge pro Woche</i>
Wie viel Zeit ist für die Durchführung der Analyse verfügbar?	<i>eine Woche ab Eingang des Änderungsantrags</i>
Wie umfangreich sind die Änderungen, welche bewertet werden müssen?	<i>Kleine Produktänderungen oder neue Varianten, welche zu einzelnen Anpassungen an den Betriebsmitteln der Produktion führen</i>

6 Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

welche analysiert werden sollen, bestimmt werden. Hierfür beantwortet der*die Anwendernde aufeinander aufbauende Single-Choice- und Multiple-Choice-Fragen, welche in den folgenden Abbildungen sequenziell, inklusive ihrer Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule, dargestellt sind. Für jede Frage ist eine Bedingung definiert, unter welcher die Frage relevant ist. Die Fragen sind der Nummerierung nach zu beantworten. Fragen, deren Bedingungen nicht erfüllt sind, werden übergangen.

Frage 1	Welche der folgenden Informationen liegen über die Änderung/en zu Beginn der Analyse bereits vor? (Multiple-Choice)	
Bedingungen	- keine -	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Änderungsursache: Kenntnis über den äußeren Einflussfaktor (Rezeptor) und dessen Veränderung, welche den Änderungsbedarf hervorruft	Grundlage für die Durchführung von Zielsetzung 1 vorhanden
b)	Betroffene Elemente der Produktion: Kenntnis der Fabrikelemente, welche durch die Änderungsursache beeinflusst werden und hinsichtlich Änderungsbedarfen analysiert werden sollen	Module 1.1 und 1.2 nicht notwendig; Modul 1.3 und/oder Expertenworkshop Modul 7 zur Spezifizierung von Änderungsbedarfen für einfacheren Start von Modul 2 möglich
c)	Änderungsbedarfe: Konkrete Änderungsbedarfe, welche durch die Änderungen adressiert werden müssen, und deren Gründe	Zielsetzung 1 nicht notwendig; Grundlage für Zielsetzung 2 vorhanden
d)	Notwendige Änderung/en ohne Berücksichtigung von Änderungsfortpflanzungen (also ohne weitere Änderungsbedarfe, die ggf. aufgrund der Vernetzung entstehen)	Zielsetzung 1 und initiale Durchführung von Zielsetzung 2 nicht notwendig; Durchführung von Zielsetzung 2 in Iteration mit Zielsetzung 3 möglich, ansonsten direkter Start der Zielsetzungen 4 bis 6
e)	Gesamtheit der notwendigen Änderung/en unter Berücksichtigung von Änderungsfortpflanzung	Zielsetzungen 1 bis 3 nicht notwendig; direkter Start der Zielsetzungen 4 bis 6 möglich
f)	Notwendiger Personalaufwand für die Durchführung der Änderung	Zielsetzung 5 nur zur Analyse von Investitionskosten notwendig
g)	Kosten für die Änderung	Zielsetzung 5 nicht notwendig
h)	Dauer für die Durchführung der Änderung	Zielsetzung 6 nicht notwendig
i)	Auswirkungen der Änderungen auf Produktionskennzahlen	Zielsetzung 4 nicht notwendig
Frage 2	Sollen die Kosten für die Planung und Umsetzung der Änderung/en bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1f und/oder 1g nicht ausgewählt.	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 5 notwendig
b)	Nein	Zielsetzung 5 nicht notwendig

Abbildung 6.3: Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil I)

6.2 Aufbau und Ablauf der Methodik

Frage 3	Soll die benötigte Dauer für die Umsetzung der Änderung/en bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1h nicht ausgewählt	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 6 notwendig
b)	Nein	Zielsetzung 6 nicht notwendig
Frage 4	Sollen die zu erwartenden Auswirkungen der Änderung/en der Produktionskennzahlen der Fabrik bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1i nicht ausgewählt	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 4 notwendig
b)	Nein	Zielsetzung 4 nicht notwendig
Frage 5	Sollen vor der Bewertung der Auswirkungen die Änderungsbedarfe und Änderungsmaßnahmen aufgrund von Änderungsfortpflanzung (also aufgrund der Vernetzung des zu ändernden Elements) bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	Entweder 2a) und/oder 3a) und/oder 4a) und nicht 1e)	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Falls 1d), Beginn mit Zielsetzung 3 und Iteration mit Zielsetzung 2, bis die Gesamtheit an Änderungsmaßnahmen feststeht und die ausgewählten Module der Zielsetzungen 4 bis 6 gestartet werden können; Falls nicht 1d), normale Iteration der Zielsetzungen 2 und 3
b)	Nein	Falls 1d), Zielsetzungen 1 bis 3 nicht notwendig, direkter Start mit den gewählten Modulen der Zielsetzungen 4 bis 6, bei Zielsetzung 4 aufgrund der Auswahl der Genauigkeiten ggf. Kombination mit Modul 7 notwendig; Falls nicht 1d), Zielsetzung 2 und keine Zielsetzung 3 notwendig
Frage 6	Sollen vor Beginn der Identifikation von Änderungsmaßnahmen eindeutige Änderungsbedarfe identifiziert werden oder reicht eine Kenntnis der potenziell betroffenen Elemente aus? (Single-Choice)	
Bedingungen	Entweder 2a) und/oder 3a) und/oder 4a) und weder 1c) noch 1d) noch 1e)	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Eindeutiger Änderungsbedarf	Analysemodul 1.3 oder Analysemodul 7 notwendig (Je nach später gewähltem Automatisierungsgrad)
b)	Betroffene Elemente ausreichend	Falls 1b), Zielsetzung 1 nicht notwendig; Falls nicht 1b), Zielsetzung 1 notwendig
Frage 7	Sollen die notwendigen Änderungsmaßnahmen aufgrund von Änderungsfortpflanzung bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	Weder 2a) noch 3a) noch 4a) noch 1e), aber 1d)	
Antwortmöglichkeiten		Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Beginn mit Zielsetzung 3 und Iteration mit Zielsetzung 2, bis die Gesamtheit an Änderungsmaßnahmen feststeht
b)	Nein	Keine Auswirkungsanalyse notwendig

Abbildung 6.4: Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil 2)

6 Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Vorgehens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion

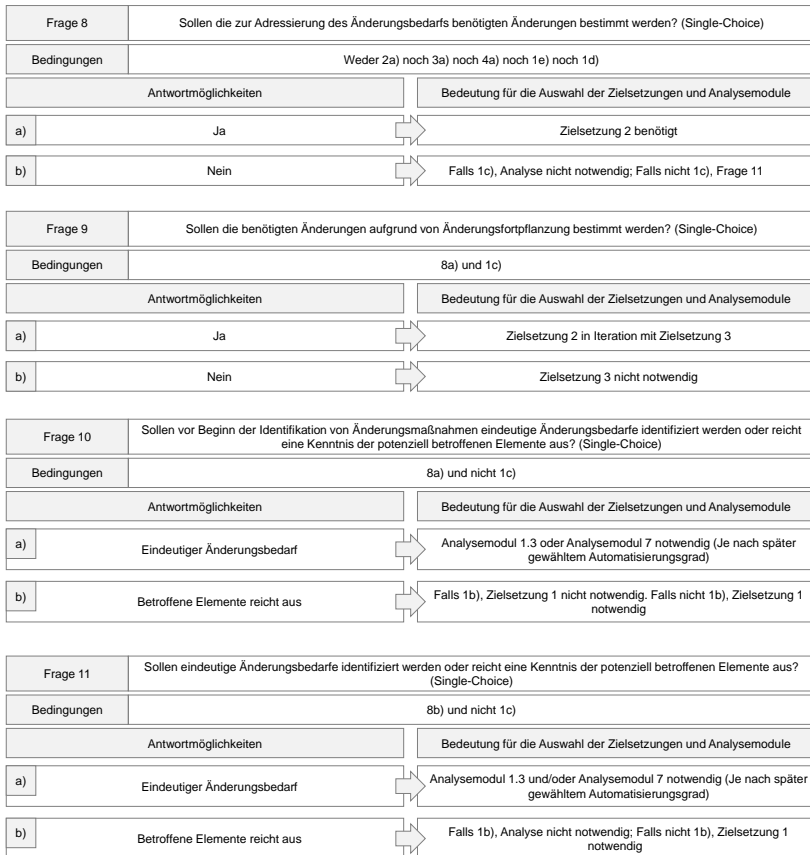


Abbildung 6.5: Fragen zur Identifikation der relevanten Zielsetzungen und Analysemodule (Teil 3)

Als Ergebnis der Beantwortung dieser Leitfragen sind die übergeordneten Zielsetzungen, welche zum Einsatz kommen sollen, festgelegt.

6.2.3 Auswahl der Analysemodule und des Automatisierungsgrads

Im nächsten Schritt müssen für jede der notwendigen Zielsetzungen/Ergebnisse die benötigten Ergebnisgenauigkeiten sowie die gewünschten Automatisierungsgrade der

Module der Zielsetzungen 1, 3 und 4 festgelegt werden. Hieraus werden die finalen Analysemodule sowie deren Kombination miteinander bestimmt, wodurch sich sowohl das Analyseverfahren als auch die notwendigen Vorbereitungen wie z. B. die Erstellung von Modellen des Produktionssystems ergeben.

Zunächst wird für jedes gewählte Modul die für die weiteren Schritte der Analyse oder des Änderungsmanagements benötigte Ergebnisgenauigkeit aus den in Abbildung 6.2 dargestellten Möglichkeiten ausgewählt. In den Modulen der Zielsetzungen 2, 5 und 6 entspricht diese Auswahl dem finalen Analysemodul, welches durchgeführt werden soll.

In den Modulen der Zielsetzungen 1, 3 und 4 wird zusätzlich zu dem finalen Ergebnis die automatisiert zu bestimmende Genauigkeit gewählt, welche auch „niedriger“ ausfallen kann, um hohe Modellierungsaufwände zu vermeiden. Hierbei sollten insbesondere die im ersten Schritt abgefragten Informationen über die Komplexität des Systems, die Verfügbarkeit von Expert*innen, die Häufigkeit der Änderungen und die Zeit für die Durchführung der Analyse berücksichtigt werden, um eine individuelle Entscheidung über das Verhältnis von Nutzen und Aufwand der unterschiedlichen Modellgenauigkeiten zu treffen. Sollten die benötigte Ergebnisgenauigkeit und die automatisiert bestimmbare Genauigkeit voneinander abweichen, werden die Ergebnisse durch eine geeignete Einbindung von Modul 7 „Expertenworkshop“ erzeugt.

6.2.4 Erstellung des fallspezifischen Analyseverfahrens und der benötigten Dokumente

Die sich final ergebenden Analysemodule werden im Sinne ihrer Sequenz aus Abbildung 6.1 abschließend miteinander verknüpft. Für das Analyseverfahren sind die Analyse-schritte der Module nacheinander durchzuführen. Die hierfür notwendigen Modelle etc. werden durch die vorbereitenden Schritte jedes Moduls erzeugt.

Somit ergibt sich als Ergebnis des Process Tailoring eine individuelle und bedarfsorientierte Analyse der Auswirkungen von Änderungen in der Produktion.

7 Evaluation der Methodik

Im Sinne des Forschungsvorhabens vom Typ 3 der DRM nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) wurde eine initiale Evaluierung im Zuge der Deskriptiven Studie II durchgeführt (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, S. 60). Bei dem Evaluationskonzept der Methodik zur individuellen Gestaltung der Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion wird zwischen einer Anwendungs- und einer Erfolgsevaluation unterschieden (BLESSING & CHAKRABARTI 2009, 180 f.). Während die Anwendungsevaluation die ganzheitliche Funktion und Anwendbarkeit der Methodik betrachtet, fokussiert sich die Erfolgsevaluation auf eine Bewertung der eigentlichen Nützlichkeit der Anwendung und der Erreichung der zuvor definierten Ziele.

Im Zuge der Anwendungsevaluation erfolgte eine ganzheitliche Anwendung in der Lernfabrik für schlanke Produktion (LSP) am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM). Hierdurch wurde eine Durchführung von mindestens einem Modul je Zielsetzung zur Bewertung der Funktionsweise und der Anforderungen aus Abschnitt 4.2 ermöglicht.

Für die Erfolgsevaluation kam die Methodik in einem industriellen Anwendungsfall zum Einsatz. Anhand der Bewertung des Aufwands sowie des Nutzens der Durchführung konnte die Wirtschaftlichkeit der Methodik initial beurteilt werden. Da wie in der Methodik vorgesehen nur einzelne Module für die individuelle Änderungsauswirkungsanalyse gewählt wurden, konnte hierdurch nicht die Funktion jedes Analysemoduls evaluiert werden.

Im Folgenden wird zunächst die Anwendungsevaluation (siehe Abschnitt 7.1) vorgestellt, um in diesem Zuge auch das Verständnis für den Ablauf der Methodik weiter zu vertiefen, bevor anschließend die Erfolgsevaluation beschrieben wird (siehe Abschnitt 7.2). Abschließend werden in Abschnitt 7.3 die Ergebnisse hinsichtlich der Anforderungen aus Kapitel 4 kritisch analysiert, das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bewertet und die Limitationen der Methodik diskutiert.

7.1 Anwendungsevaluation in der Lernfabrik für schlanke Produktion

Die LSP am *iwb* der TUM bietet eine industrienaher Montageumgebung für die Schulung der Philosophie, Prinzipien und Methoden der schlanken Produktion (ABELE ET AL. 2019, S. 401–404). Die darin abgebildete fiktive LSP GmbH produziert einen industriellen Getriebemotoren¹ mit 18 unterschiedlichen Komponenten, 24 Varianten und mehr als 20 Montageschritten. Die manuelle Montage umfasst dabei drei bis vier Arbeitsstationen, in welchen Steck-, Schraub-, Prüf- und Verpackungsprozesse durchgeführt werden. Die Montagelinie wird von einem Supermarktregal per Kanban-Steuerung mit Material versorgt. Die Auftragssteuerung erfolgt elektronisch über die digitalen Werkerassistenzsysteme an jedem Arbeitsplatz, durch welche ebenso die Montageanweisungen angezeigt werden. Als Betriebsmittel stehen den Mitarbeitenden des Weiteren Akkuschauber, Zangen und eine Prüfstation zur Verfügung. Auf dem Shopfloor-Board der LSP GmbH werden die Kennzahlen Durchlaufzeit, Ausbringung, Fehler, Lieferquote und Stückkosten überwacht.

Die Schulungen in der LSP umfassen ein mehrtätiges Programm aus Theorie und Praxis, in welchem die Montagelinie schrittweise durch Änderungen im Sinne der kontinuierlichen Verbesserung optimiert wird. Gleichzeitig arbeiten die Trainer*innen des *iwb* der TUM zwischen den Schulungsterminen neue Inhalte und Erweiterungen der LSP aus, wodurch ebenso Änderungen an der Umgebung vorgenommen werden. Für beide Fälle besteht derzeit kein strukturiertes Vorgehen für die Analyse von Änderungsauswirkungen, wobei die geringe bis mittlere Komplexität des Produktionssystems eine demonstrative ganzheitliche Anwendung der Methodik dieser Arbeit ermöglicht. Die LSP wird dementsprechend als geeignete Umgebung für die Anwendungsevaluation der Methodik der vorliegenden Arbeit angesehen².

¹ Das Produkt der LSP GmbH ist ein kommerzieller Getriebemotor, welcher von einem Kooperationspartner des *iwb* der TUM vertrieben wurde.

² Sowohl das Produkt als auch die Ausstattung mit Betriebsmitteln entsprechen industriellen Montagesystemen außerhalb der Laborumgebung. Die Logistik sowie die IT-Infrastruktur zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sind in Relation zur industriellen Praxis stark vereinfacht. Zudem sind keine Fertigungsprozesse wie z. B. Umformen oder Trennen, die in der Regel nochmals stärkere Abhängigkeiten bzgl. der Material- und Produkteigenschaften aufweisen, vorhanden. Die Trainer*innen der Lernfabrik sind hinsichtlich ihrer Kenntnis über das Montagesystem sowie ihrer Ausbildung in der Produktionstechnik mit Mitarbeitenden einer Arbeitsvorbereitung und Produktionsplanung, die die Zielgruppe der Methodik dieser Arbeit darstellen, vergleichbar.

7.1.1 Konfiguration der Auswirkungsanalyse

Schritt a) Bestimmung der Position im Änderungsmanagement, der Rahmenbedingungen und der Ziele

Die LSP GmbH verfügt über keinen standardisierten Änderungsprozess. Anpassungen erfolgen jedoch in der Regel nach dem Plan-Do-Check-Act-Zyklus. Die Planung der Änderungsmaßnahmen und somit auch die Analyse von deren Änderungsauswirkungen erfolgt dabei in der Plan-Phase. Regelmäßige Änderungen sind einerseits bei der Integration neuer Produktionstechnologien sowie bei der Veränderung des Produkts festzustellen. Zum Zeitpunkt, zu welchem die Analyse eingebunden werden soll, sind die neue Technologie oder das angepasste Produkt bereits bekannt. Weitere Informationen liegen noch nicht vor. Damit die anschließende Do-Phase problemlos durchgeführt werden kann, gilt es, in der Plan-Phase alle notwendigen Änderungsmaßnahmen zu identifizieren und Kosten, Dauer, Aufwand und Auswirkungen auf das Shopfloor-Board zu bestimmen. Die Analyse muss dabei in ca. einer Stunde durchführbar sein, um die Anwendung in einer Schulung zu ermöglichen. Gleichzeitig kann grundsätzlich auf eine ganzheitliche und detaillierte Kenntnis des Produktionssystems durch die Trainer*innen der LSP GmbH zurückgegriffen werden. In Tabelle 7.1 ist die Beantwortung des Fragebogens zu Schritt a) durch die Trainer*innen der LSP aufgezeigt.

Auf Basis der grundsätzlichen Rahmenbedingungen wurde durch die Trainer*innen der LSP das folgende Ziel für die Auswirkungsanalyse formuliert: „Bestimmung aller Änderungsmaßnahmen und der zu erwartenden Kosten, Dauer, Aufwand und Auswirkungen auf das Shopfloor-Board“.

Schritt b) Auswahl der benötigten Zielsetzungen der Analysemodule

In Abbildung 7.1 ist die Beantwortung des Fragebogens zu Schritt b) durch die Trainer*innen der LSP ersichtlich.

Zusammenfassend sind somit alle Zielsetzungen 1 bis 6 notwendig. Der Einsatz von Modul 7 zur Entscheidung über die finalen Änderungsbedarfe in Zielsetzung 1 ist davon abhängig, ob alle Vernetzungen in der Genauigkeit von Modul 1.3 abgebildet werden können.

Tabelle 7.1: Festlegung der Rahmenbedingungen in der Anwendungsevaluation

Frage	Antwort
Unternehmens-/Systembezogene Umstände	
Kann das betrachtete System von einzelnen Expert*innen vollumfänglich verstanden werden oder ist für eine ganzheitliche Analyse eine Abstimmung mit einer Vielzahl an Expert*innen notwendig?	<i>Die Trainer*innen der LSP sind in der Lage, eine ganzheitliche Analyse durchzuführen. Die Teilnehmenden von Schulungen haben nur eine begrenzte Kenntnis des Systems.</i>
Sind die notwendigen Expert*innen für die Analyse der Änderungen einfach, verlässlich und am besten simultan verfügbar?	<i>Für die Weiterentwicklung der Lernfabrik ja, für Änderungen im Rahmen von Schulungen nein.</i>
Welche Modelle/Prozessdokumentationen liegen über das System vor?	<i>Wertstromanalyse, 2D-Layout-Zeichnung, Arbeitsanweisungen und Taktzeiten der Tätigkeiten, Stücklisten, Bauteilbilder, Kennzahlen-Board, Montagevorranggraph</i>
Welche Schritte folgen im Änderungsmanagementprozess der Analyse der Änderungsauswirkungen?	<i>Maßnahmenplanung, Budgetplanung, Ressourcenplanung, Änderungsdurchführung</i>
Welche Informationen müssen für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Schritte vorliegen?	<i>Notwendige Änderungen, Änderungskosten, Personalaufwand, Umsetzungsdauer; zu erwartende Produktionskennzahlen</i>
Prozessbezogene Aspekte	
Welche Schritte des Änderungsmanagementprozesses wurden bereits vor der Analyse durchgeführt?	<i>Planung der Änderungsursache, also z. B. was soll am Produkt geändert werden oder welche Technologie soll integriert werden?</i>
Was ist über die Änderung somit schon bekannt?	<i>Änderungsursache (Produkt/Technologie)</i>
Anwendungsfallbezogene Gegebenheiten	
Wie häufig müssen Änderungen analysiert werden?	<i>Einerseits in jeder Schulung mehrere Änderungen und andererseits ca. einmal im Quartal eine größere Änderung zur Weiterentwicklung der Schulungsumgebung.</i>
Wie viel Zeit ist für die Durchführung der Analyse verfügbar?	<i>ca. eine Stunde</i>
Wie umfangreich sind die Änderungen, welche bewertet werden müssen?	<i>In der Regel mehrere kleinere/mittlere Anpassungen, die in wenigen Stunden umsetzbar sind.</i>

7.1 Anwendungsevaluation in der Lernfabrik für schlanke Produktion

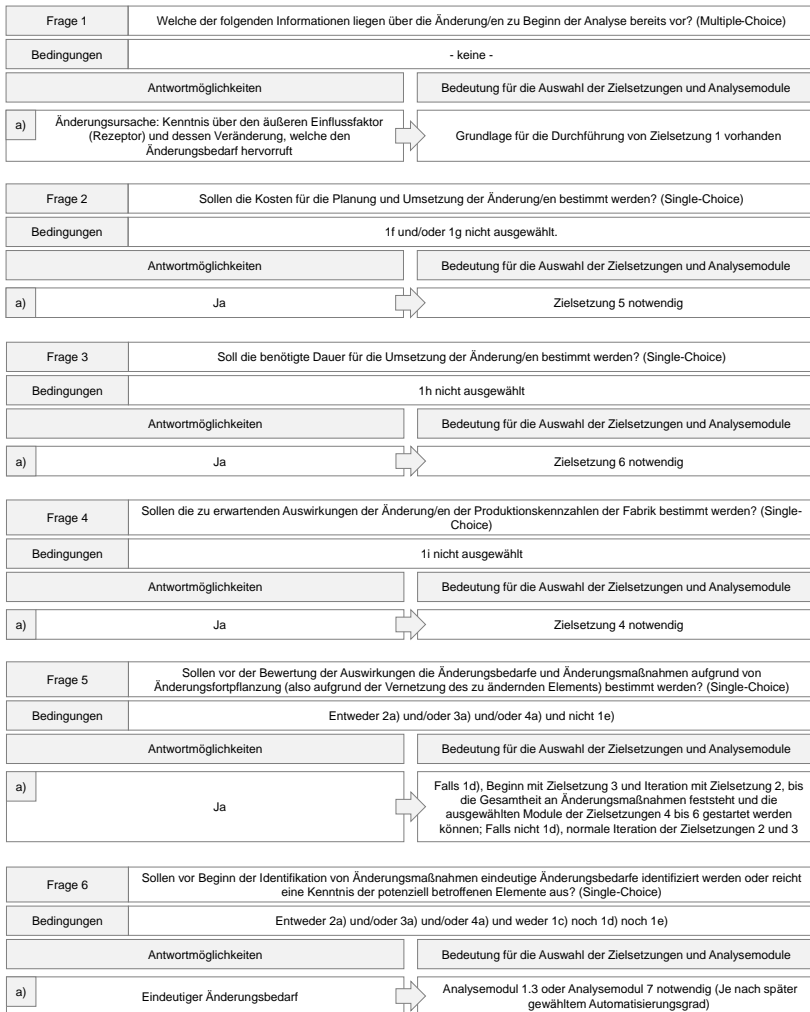


Abbildung 7.1: Identifikation der relevanten Module bzw. Bereiche – Anwendungsevaluation

Schritt c) Auswahl der Analysemodule und des Automatisierungsgrads

Um die Durchführung der einzelnen Analysen effizient zu gestalten, wird in der Analyse ein möglichst hoher Automatisierungsgrad angestrebt. Dennoch muss berücksichtigt

werden, ob die Modellierung in der dafür benötigten Detaillierung in jedem Modul möglich ist. Vor diesem Hintergrund wurden von den Trainer*innen der LSP die folgenden Genauigkeiten und Analysemodule ausgewählt:

- Betroffene Fabrikobjekte und Änderungsbedarfe: Für mathematisch beschreibbare Bedingungen/Abhängigkeiten, wie beispielsweise die Breite von Montagevorrichtungen, wird Analysemodul 1.3 genutzt. Für alle weiteren Beziehungen kommt Analysemodul 1.1 zum Einsatz, da in jedem Fall alle Auswirkungen geprüft werden sollen und eine Zusatzinformation somit als nicht hilfreich angesehen wird.
- Änderungsmaßnahmen: Durch Analysemodul 2.2 sollen mögliche Änderungsoptionen aufgezeigt werden, sofern zu diesem Zeitpunkt des Änderungsmanagements Alternativen bestehen.
- Änderungsbedarf durch Änderungsförpflanzung: Für mathematisch beschreibbare Bedingungen/Abhängigkeiten wie beispielsweise die Austaktung und die maximale Taktzeit der Montagelinie wird Analysemodul 3.3 genutzt. Für alle weiteren Beziehungen kommt Analysemodul 3.1 zum Einsatz, da ebenso in jedem Fall alle Auswirkungen geprüft werden sollen und eine Zusatzinformation somit als nicht hilfreich angesehen wird.
- Einfluss auf Produktionskennzahlen: Die Lernfabrik bietet ausreichend Planungs- und Testmöglichkeiten, um die Auswirkungen der Änderungen auf die Prozessparameter der Fabrikebene „Station“ in annehmbarer Zeit eindeutig bestimmen zu können. Somit können mit Analysemodul 4.6 auch die Auswirkungen auf die Produktionskennzahlen des Shopfloor-Boards eindeutig berechnet werden.
- Änderungskosten, Änderungsaufwand und Umsetzungsdauer: Die Kosten, Aufwände und Dauer der Änderung sollen schnell abgeschätzt werden, ohne detaillierte Recherchen und Kalkulationen durchführen zu müssen. Gleichzeitig liegen zum Zeitpunkt der Analyse noch keine Kostenangebote oder ähnliches vor. Somit sollen die Analysemodule 5.1 und 6.1 zum Einsatz kommen.

Schritt d) Erstellung des fallspezifischen Analyseverfahrens und der benötigten Dokumente

Für die Analysemodule 1.1 und 1.3 gilt es in der Vorbereitung, die benötigten DMMs zur Modellierung der Abhängigkeiten zwischen Änderungsursache und Produktionssystem zu erstellen. Als Rezeptoren stehen hier einerseits das Produkt und andererseits die Produktionstechnologien im Fokus. Während die änderbaren Produkteigenschaften mit den technischen Betriebsmitteln der Arbeitsstationen in Verbindung gebracht werden sollen, wurde vom LSP-Team entschieden, die Produktionstechnologien allgemein durch ihre Tätigkeiten (z. B. Fügen) oder spezifische technische Daten (z. B. Schrauben maximales Drehmoment) mit den Tätigkeiten an den Arbeitsstationen (z. B. Greifen Zylinder oder Schrauben) in Abhängigkeit zu bringen. In allen Fällen, in welchen durch die vorhandenen Betriebsmittel und Produktkomponenten klare Anforderungen bestehen – wie beispielsweise die maximale Breite der Vorrichtungen zum Verschrauben an den Stationen zwei und drei –, wurden mathematische Bedingungen modelliert. Ansonsten wurden die Abhängigkeiten durch ein „X“ dokumentiert. Ein Auszug aus der produktbezogenen DMM ist in Abbildung 7.2 dargestellt.³

Beeinflussbare Eigenschaften: Technik/Technologie/Betriebsmittel		Aktuellen Wert der Produkteigenschaft eintragen	Arbeitsplatz 2			
			AP 2 Allgemein	Akkuschrauber AP 2	Vorrichtung Verschrauben Getriebestufen	
ID:	Produkteigenschaft:	Wert:	ID:	BE_05	BE_06	BE_07
PE_01	Durchmesser Getriebemotor [mm]	48				PE_01<=50
PE_02	Länge Getriebemotor					
PE_03	Durchmesser Abtriebswelle (für Funktionstest & Werkstückträger)					
PE_04	Senkschraube kurz Antrieb (Torx = 1, Kreuz = 2, Schlitz = 3)	1		PE_04=1		
PE_05	Zylinderschraube lang Antrieb (Torx = 1, Kreuz = 2, Schlitz = 3)	1		PE_05=1		
PE_06	Senkschraube kurz Größe (Angabe des notwendigen Schrauber-Bits)	6		PE_06=6		
PE_07	Zylinderschraube lang Größe (Angabe des notwendigen Schrauber-Bits)	6		PE_07=6		
PE_08	Durchmesser Hohlradträger (kleine Seite, für Werkstückträger)					
PE_09	Planetengehäuse					
PE_10	Hohlradträger					
PE_11	Motor 12V					
	Motor 24V					

Abbildung 7.2: Auszug aus der DMM „Produkt zu Betriebsmittel“ der LSP

Der Workshop zur Definition von Änderungsmaßnahmen soll anhand der Agenda des

³ Die vollständige Modellierung ist unter dem folgenden Link verfügbar: <https://drive.google.com/file/d/170-3PuS60TrNbfYRtuWWqpXUHFobkulN/view?usp=sharing>.

Analysemoduls in einer offenen Diskussion durchgeführt werden. Da der Personenkreis entweder die LSP-Betreuenden oder eine festgelegte Teilnehmendengruppe umfasst, sind keine weiteren Workshopmethoden vorgesehen. Die übergeordnete Zielsetzung ist die Erarbeitung von Änderungsalternativen sowie die Identifikation aller damit verbundenen Maßnahmen unter Berücksichtigung von Änderungsfortpflanzungen. Die Analyse von Änderungsfortpflanzungen soll in die Diskussion integriert werden. Somit ergibt sich für die Analyse die folgende Agenda:

- Themeneinführung: Änderungsbedarf und Zielsetzung vorstellen
- Arbeitsphase (offene Diskussion): Festlegung von Änderungsoptionen, Analyse von Änderungsfortpflanzungen, Diskussion von Maßnahmen aufgrund von Änderungsfortpflanzungen
- Abschluss: Befüllung des Änderungssteckbriefs

Für die Analyse der Änderungsfortpflanzungen (Module 3.1 und 3.3) wurde anschließend die graphenbasierte Systemmodellierung durchgeführt. Neben den Abhängigkeiten der Prozesse der LSP in Form von Material-, Informations- und Energieflüssen wurden die maximale Taktzeitschwankung zwischen den Stationen mit 20 % sowie die Unterschreitung des Kundentakts von 120 Sekunden als einzuhaltende Bedingungen festgelegt. Aufgrund der flexiblen Layoutgestaltung der Lernfabrik wurde kein 2D-Layout im Hintergrund platziert. Ein Auszug aus der graphenbasierten Modellierung der LSP ist in Abbildung 7.3 dargestellt.⁴

Hinsichtlich der Änderungsauswirkungen auf Produktionskennzahlen wurden die Durchlaufzeit sowie die Stückkosten als relevante Top-Level-Kennzahlen gewählt. Ein Auszug aus dem Kennzahlen-Rechensystem der Stückkosten der LSP ist in Abbildung 7.4 dargestellt.⁵

Zur Durchführung von Modul 5.1 wurden in der Vorbereitung die relevanten Kostenpositionen der Excel-Vorlage ausgewählt sowie der Stundenlohn der Mitarbeitenden auf 50 € festgelegt. Zur Bewertung der Änderungsdauer werden – da die LSP über keinen

⁴ Die vollständige Modellierung ist unter folgendem Link verfügbar: <https://drive.google.com/file/d/1LS6O7oGDOVKQFVVND89H0aCo59hO4VO8/view?usp=sharing>

⁵ Die vollständige Modellierung sowie das Kennzahlen-Rechensystem für die Durchlaufzeit sind unter folgendem Link verfügbar: https://drive.google.com/file/d/1J39a5uM5n7_iHFseEHcSCB7hAIfKlpxdp/view?usp=sharing.

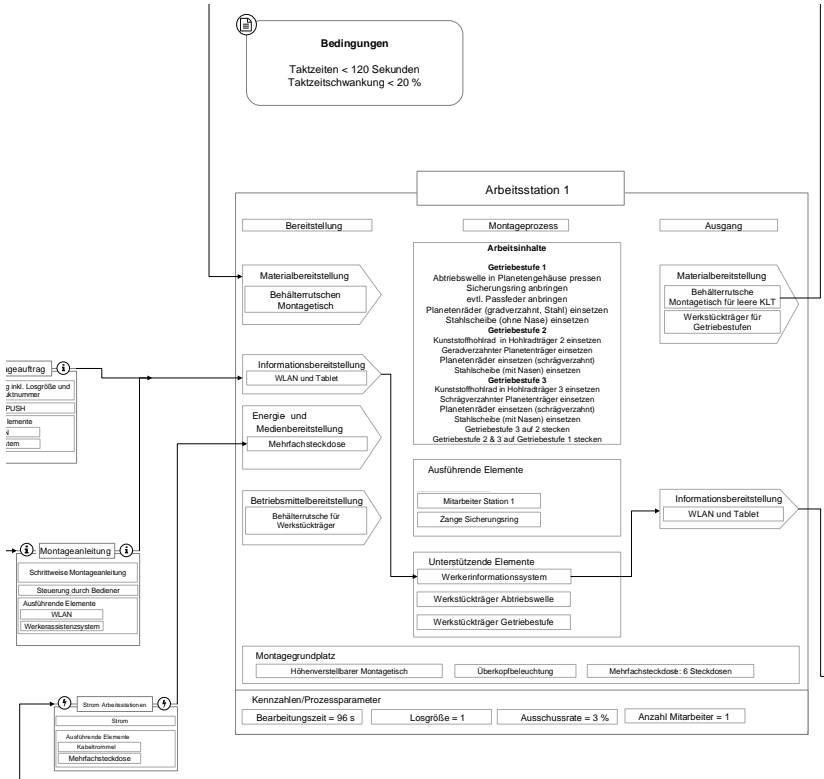


Abbildung 7.3: Auszug aus der graphenbasierten Modellierung der LSP

definierten Änderungsprozess verfügt – die Schritte des Prozesses nach RÖSSING (2007) genutzt.⁶

Der individuelle Gesamtprozess ergibt sich aus der Verknüpfung der durchzuführenden Analysemodule und ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Der zeitliche Aufwand für die Erstellung der benötigten Dokumente ist in Tabelle 7.2 aufgelistet.

⁶ Die finalen Bewertungslisten sind unter folgenden Links verfügbar: https://drive.google.com/file/d/1IZwpWnNdsyQRhipZIVZDD_1CLDD-LWoR/view?usp=sharing und https://drive.google.com/file/d/1eB7NcxQ4RIG77cCsLJ697vND3cXxh_dc/view?usp=sharing.

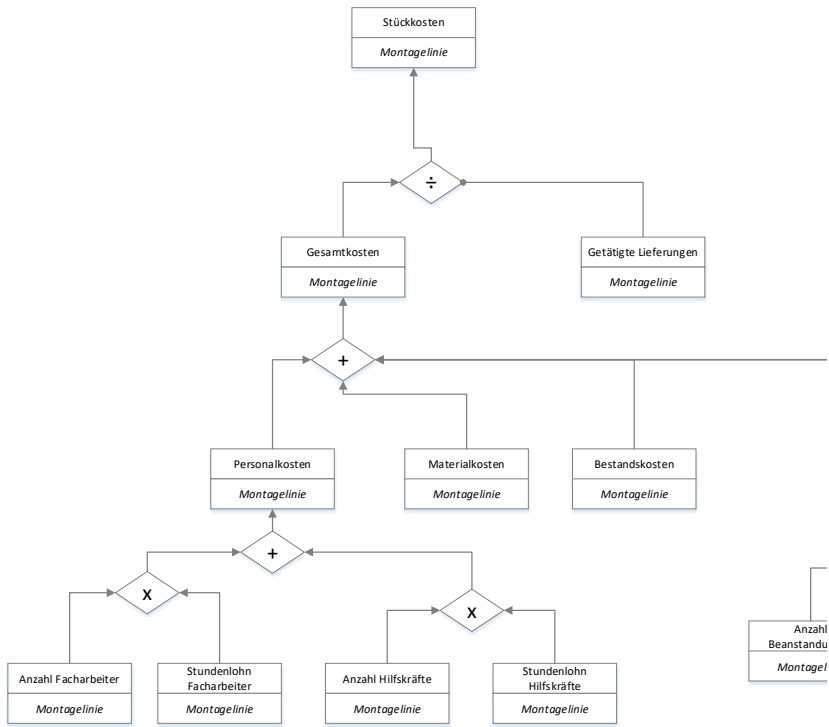


Abbildung 7.4: Auszug aus dem Kennzahlen-Rechensystem der LSP

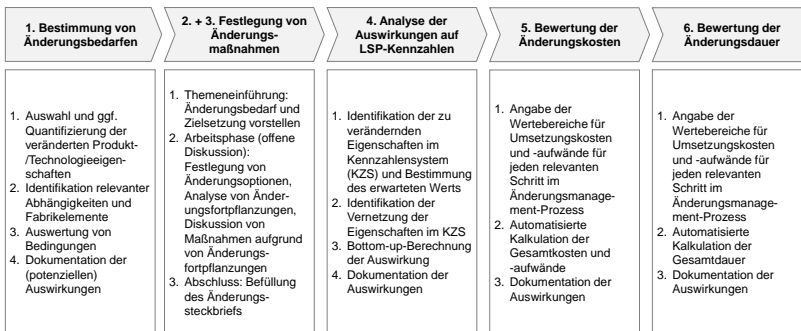


Abbildung 7.5: Prozess zur Analyse von Änderungsauswirkungen in der LSP

Tabelle 7.2: Zeitaufwand zur Konfiguration und Vorbereitung der fallspezifischen Auswirkungsanalyse in der LSP

Tätigkeit	Zeitaufwand [Min.]
Schritt a) Rahmenbedingungen und Ziele	15
Schritt b) Auswahl Zielsetzungen	10
Schritt c) Auswahl Analysemodule und Automatisierungsgrad	10
Schritt d)	
Analysemodul 1.1/1.3: Erstellung der DMMs	90
Analysemodul 2.2: Definition Workshopziele und -ablauf	10
Analysemodul 3./3.3: Graphenbasierte Systemmodellierung	120
Analysemodul 4.6: Erstellung Kennzahlenrechensystem	20
Analysemodule 5.1 und 6.1: Vorbereitung Excel-Strukturen	10
Summe	285

7.1.2 Auswirkungsanalyse der Einführung eines neuen Schraubsystems

Als zu analysierende Änderung soll im Weiteren die Einführung eines neuen Schraubsystems untersucht werden, da dies die häufigste Verbesserung des Produktionssystems im Rahmen der Schulungen darstellt. Die Ursache hierfür ist die aufwendige Handhabung der Akkuschauber. Einerseits müssen diese manuell im Arbeitsbereich abgestellt werden, um andere Tätigkeiten ausführen zu können. Andererseits ist eine Einstellung des Schraubvorgangs auf die unterschiedlichen Schraubarten nicht möglich.

Als neues Betriebsmittel stehen programmierbare Stabschrauber, welche zudem eine Zugbefestigung über dem Arbeitsplatz aufweisen, zur Verfügung. Als Aufsätze liegen unterschiedliche Torx Größen vor. Die Schrauber können individuell in einem Drehmomentenbereich von 0,01 - 25 Nm und einem Drehzahlbereich von 100 bis 2.000 Umdrehungen pro Minute eingestellt werden. Durch die Definition bestimmter

Schraubprogramme ist zudem ein Feedback des Schraubers hinsichtlich der Qualität der Verschraubung möglich. Beispielsweise kann überprüft werden, ob das maximal eingestellte Drehmoment eingehalten wurde.

Im ersten Schritt werden in der DMM die Einträge „Schrauben“, „Schrauben Max. Drehzahl (min^{-1})“ und „Schrauben Max. Drehmoment (Nm)“ spezifiziert und ausgewertet. Die mathematischen Bedingungen sind durch das neue Schraubsystem erfüllt. Die Analyse ergibt jedoch zu untersuchende Abhängigkeiten des Schraubens mit den Arbeitsplätzen 2 und 3. In der genaueren Analyse wird festgestellt, dass an diesen Stationen unter anderem die Stromzufuhr für die neuen Schrauber untersucht werden muss und Änderungsbedarfe an den Vorrichtungen bestehen. Um diese Punkte weiter zu spezifizieren, erfolgt die Diskussion der notwendigen Maßnahmen unter Berücksichtigung von Änderungfortpflanzungen mit Hilfe der graphenbasierten Modellierung des Produktionssystems.

Die Stromzufuhr ist an allen Arbeitsplätzen durch diverse Steckdosenleisten sichergestellt. Die vorhandenen Vorrichtungen unterstützen die vertikale Schraubrichtung, welche durch die Befestigung der Stabschrauber an den Überkopfleuchten der Arbeitsplätze bedingt ist, nur begrenzt. Die Materialflussabhängigkeiten der Stationen 2 und 3 werden durch die neuen Schraubsysteme nicht weiter beeinflusst. Die aktuellen Informationsflüsse der Werkerassistenzsysteme könnten durch die Rückmeldedaten der Schrauber erweitert werden. Des Weiteren könnten die Programme der Schrauber direkt durch das System zur PPS angesteuert werden. In der Diskussion wird jedoch festgestellt, dass hierfür eine speicherprogrammierbare Steuerung als Schnittstelle eingerichtet werden müsste, weshalb die Integration der Schrauber in die IT-Systeme zunächst nicht vorgenommen werden soll. Die Vorschriften hinsichtlich maximaler Taktzeit sowie der Taktzeitschwankung zwischen den Stationen sind aufgrund der erwarteten Zeiteinsparungen an den Stationen 2 (größte erwartete Verbesserung) und 3 unbedenklich. Somit sind abschließend die Einrichtung der Schraubsysteme sowie die Anpassungen der Schraubvorrichtungen an den Stationen 2 und 3 als Änderungsmaßnahmen zu nennen. Diese werden als Basis für die weiteren Analyseschritte in den Änderungssteckbrief aufgenommen, in welchem an diesem Punkt die Bereiche eins bis vier sowie die Kurzbeschreibung der Maßnahmen in Bereich fünf befüllt werden (siehe Abbildung 7.6).

Anhand des Kennzahlen-Rechensystems werden anschließend die Auswirkungen auf

Änderungssteckbrief			
1. Rahmendaten			
ID _____	1	Bezeichnung _____	Einführung Stabschrauber
Datum _____	11.10.2021	Bezugsobjekt _____	Getriebemontage
Verantwortlich _____	LSP-Gruppe 1	Status _____	In Planung
2. Änderungsursache, -bedarf und Zielsetzung der Änderung			
Änderungsursache		Resultierender Änderungsbedarf	
Neue Schraubtechnologie		Anpassung Schraubvorrichtung Station 2	
		Anpassung Schraubvorrichtung Station 3	
		Einführung Schraubsystem an Stationen 2 & 3	
3. Betroffene Produktionsbereiche und Ansprechpartner			
Produktionsbereich		Ansprechpartner	
Getriebemontage Station 2		Gruppe 1 – Montagemitarbeiter 1	
Getriebemontage Station 3		Gruppe 1 – Montagemitarbeiter 2	
4. Beschreibung des Änderungskonzepts			
Einführung von programmierbaren Stabschraubern an den Stationen 2 und 3; Zugbefestigung an der Überkopfbeleuchtung; Anpassung der Schraubvorrichtungen für vertikales Schrauben			
5. Notwendige Maßnahmen im Falle einer Umsetzung			
Kurzbeschreibung	Dauer	Personalaufwand	Kosten
Anschließen Stabschrauber			
Einrichten Schraubprogramme	3,6 – 6,2	7,2 – 16,2	380 – 910
Entwicklung Schraubvorrichtungen	Tage	Stunden	€
Fertigung Schraubvorrichtungen			
6. Auswirkungen auf Produktionskennzahlen			
Kennzahl	Beschreibung bzw. Quantifizierung der Auswirkung		
Durchlaufzeit	Verringerung von 885 Sekunden auf 840 Sekunden		
Stückkosten	Verringerung der Anzahl an Beanstandungen zu erwarten (derzeit nicht quantifizierbar)		

Abbildung 7.6: Änderungssteckbrief zur Einführung neuer Stabschrauber in die Getriebemontage der LSP GmbH

die Durchlaufzeit und die Stückkosten der Getriebe betrachtet. Durch die Optimierung des Schraubprozesses ist nach ersten Testläufen absehbar, dass an Station 2 eine Zeiteinsparung von ca. 10 Sekunden (Verringerung der Montagezeit von 112 Sekunden auf 102 Sekunden) und an Station 3 eine Einsparung von 5 Sekunden (Verringerung der Montagezeit von 87 Sekunden auf 82 Sekunden) möglich sind. Unter Annahme eines mittleren Bestands zwischen den Stationen von zwei Getrieben ergibt sich im Kennzahlensystem eine Verringerung der Durchlaufzeit von 885 Sekunden auf 840 Sekunden. Hinsichtlich der Stückkosten erwartet das Änderungsteam lediglich bei der Anzahl der Beanstandungen eine Verbesserung im Vergleich zum aktuellen Zustand. Diese kann jedoch im Voraus nicht quantitativ bewertet werden. Die Analyse der

Auswirkungen auf die Produktionskennzahlen wird zum Abschluss von Schritt 4 im Bereich sechs des Änderungssteckbriefs dokumentiert.

Die Bewertung von Änderungskosten/-aufwand und Änderungsdauer erfolgt in Form von Wertebereichen anhand der vorbereiteten Kostenpositionen und Prozessschritte. Während zur Initialisierung der Änderung keine weiteren Analysen notwendig sind, müssen insbesondere zur Erstellung der neuen Vorrichtungen technische Planungen, Prototypenfertigungen und Managementfreigaben durchgeführt werden. Im Nachgang müssen unter anderem die Montagestandards für die Stationen 2 und 3 angepasst und die Lessons Learned dokumentiert werden. Die aus den Einzelpositionen berechneten Ergebnisse der Bewertungen des Änderungsteams sind in Abbildung 7.7 dargestellt.⁷ Mit dem Eintrag der Analyseergebnisse in den Bereich fünf des Änderungssteckbriefs ist die Auswirkungsanalyse abgeschlossen (siehe Abbildung 7.6).

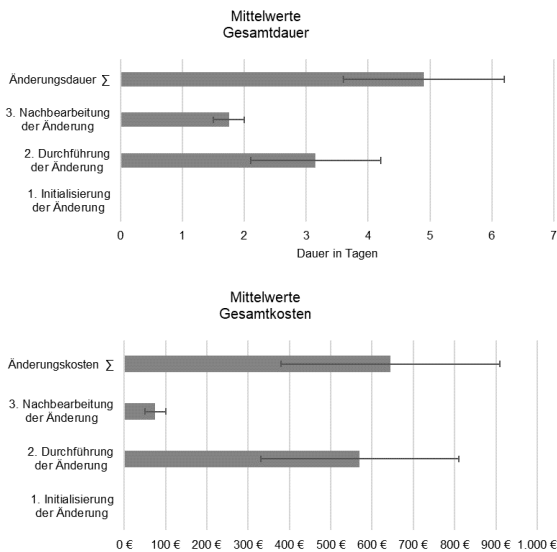


Abbildung 7.7: Bewertung der Änderungskosten und Änderungsdauer zur Einführung neuer Stabschrauben in die Getriebemontage der LSP GmbH

⁷ Die befüllten Bewertungslisten sind unter folgenden Links verfügbar: https://drive.google.com/file/d/1IZwpWnNdsyQRhiPZIVZDD_1CLDD-LWoR/view?usp=sharing und https://drive.google.com/file/d/1eB7NcxQ4RIg77cCsLJ697vND3cXxh_dc/view?usp=sharing.

Durch die beschriebene Anwendung in der LSP konnte die Anwendbarkeit der Methodik erfolgreich geprüft werden. Auf Basis der verfügbaren Leitfragen wurde die individuelle Auswirkungsanalyse zielorientiert konfiguriert. Die Vorbereitung der Analysemodule konnte mit Hilfe der Modulbeschreibungen und unterstützenden Werkzeuge erfolgen, wobei sich die graphenbasierte Systemmodellierung für die Analysemodule der Zielsetzung 3 als aufwendigste Modellierung herausstellte. Die Analyse der Auswirkungen einer Technologieänderung konnte anschließend effizient durchgeführt werden und lieferte die vorher definierten Ergebnisse. Um im Folgenden die Nützlichkeit der Methodik zu untersuchen, wird in Abschnitt 7.2 die Erfolgsevaluation beschrieben.

7.2 Erfolgsevaluation in der industriellen Praxis

Die Erfolgsevaluation der Methodik erfolgte an der Schnittstelle von Produktentwicklung und technischer Produktionsplanung in der additiven Fertigung in der Automobilindustrie. In diesem Bereich werden regelmäßig Produkte hinsichtlich ihrer Eignung für die additive Fertigung untersucht, was gleichzeitig auch mit notwendigen oder möglichen Änderungen am Produkt einhergeht. Die Produktänderungen, die sowohl zur Nutzung der Potenziale der additiven Fertigung als auch zur Verbesserung der Herstellbarkeit der Produkte erfolgen, werden hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Produktionsbereiche analysiert, um über die Durchführung sowie finale Ausgestaltung von Anpassungen zu entscheiden. Die für die Produktion der Produkte bestehende Prozesskette umfasst das SLM, das Entpacken der additiv gefertigten Bauteile, eine Wärmebehandlung, eine Vereinzelung, das Gleitschleifen, das Waschen, das Prägen, den Zusammenbau und die Verpackung. Während diese Prozesse den Fokus der Betrachtung darstellen, müssen bei Änderungen auch die Wechselwirkungen im Gesamtsystem beispielsweise mit der Logistik oder der Produktionssteuerung analysiert werden, um alle Schritte und Aufwände für die Umsetzung einer Änderung bewerten zu können.

Im Folgenden wird zunächst die Durchführung des Konfigurationsprozesses in diesem Anwendungsfall beschrieben (siehe Abschnitt 7.2.1), bevor die Anwendung des dadurch erstellten, individuellen Analyseprozesses für eine beispielhafte Änderung erläutert wird (siehe Abschnitt 7.2.2). Dabei wird das Unternehmen, in welchem die Evaluation erfolgte, als Auto AG bezeichnet.

7.2.1 Konfiguration der Auswirkungsanalyse

Schritt a) Bestimmung der Position im Änderungsmanagement, der Rahmenbedingungen und der Ziele

Der Änderungsprozess des betrachteten Unternehmens umfasst im Groben sechs sequentielle Schritte (siehe Abbildung 7.8). Zunächst erfolgt durch den*die Änderungsmanager*in die Analyse einer Änderungsursache, welche zu einer Änderungsanfrage führt. Gemeinsam mit dem Simultaneous-Engineering-Team (SE-Team) erarbeitet der*die Änderungsmanager*in mögliche Produktänderungen, um den Änderungsbedarf zu adressieren. Nach einer ersten Vorbewertung und -auswahl der relevanten Änderungskonzepte wird eine detaillierte Analyse der Änderung(en) durch alle betroffenen Produktionsbereiche vorgenommen. Für die finale Genehmigung ist anschließend ein gesondertes Entscheidungsgremium zuständig, bevor es zur Umsetzung der Änderung(en) durch die betroffenen Unternehmensbereiche kommt.

Während für die detaillierte Bewertung bereits diverse spezifische Bewertungsvorgehen in den einzelnen Produktionsbereichen vorliegen, erfolgt die Diskussion von Änderungskonzepten und deren Vorbewertung derzeit in regelmäßigen Terminen in offener Diskussionsrunde. Vor allem die Identifikation der relevanten Unternehmensbereiche – auch im Hinblick auf die Detailbewertung – stellt dabei einer Herausforderung dar.

	Prozessschritt	Verantwortlichkeit	
1)	Analyse der Änderungsursache und Anfrage einer Änderung	Änderungsmanager*in	} Unterstützung durch die individuelle Auswirkungsanalyse
2)	Erarbeitung von Änderungsmaßnahmen (Produktänderung)	Änderungsmanager*in und Simultaneous Engineering	
3)	Erstellung und Vorbewertung von Änderungskonzepten	Änderungsmanager*in und Simultaneous Engineering	
4)	Detaillierte Bewertung des Änderungskonzepts	Alle betroffenen Produktionsbereiche	
5)	Genehmigung des Änderungsvorhabens	Entscheidungsgremium	
6)	Steuerung/Umsetzung der Änderung	Alle betroffenen Produktionsbereiche	

Abbildung 7.8: Position der Auswirkungsanalyse im Änderungsprozess des Anwendungspartners

Zur Spezifikation der Rahmenbedingungen sowie der Zielsetzung der Analyse wurde der Fragebogen zu den Rahmenbedingungen des Anwendungsfalls in Tabelle 7.3 beantwortet.

Das Ziel des neuen Analyseverfahrens wurde zusammenfassend als „die Strukturierung und die Erhöhung der Effizienz der Konzepterstellung und Vorbewertung im regelmäßigen Termin des SE-Teams, unter anderem durch eine schnelle Identifikation der betroffenen Produktionselemente und -bereiche“, festgelegt.

Schritt b) Auswahl der benötigten Zielsetzungen der Analysemodule

Auf Basis der Zielsetzung wurde anschließend die Auswahl der benötigten Module durch die Mitarbeitenden des Anwendungspartners vorgenommen (siehe Abbildung 7.9).

Zusammenfassend liegt der Fokus der Analyse auf der schnellen Identifikation direkter Zusammenhänge zwischen den Produktänderungen bzw. den Produkteigenschaften sowie den Elementen des Produktionssystems und den damit verbundenen Bereichen/-Stakeholdern. Diese Analyse soll in die Maßnahmen- und Konzeptentwicklung im SE-Team, welche der Durchführung von Modul 2.2 gleichkommt, integriert werden.

Schritt c) Auswahl der Analysemodule und des Automatisierungsgrads

Die Durchführung der Analysemodule der Zielsetzung 1 dient dazu, den Expert*innen des SE-Teams eine strukturierte Grundlage für die manuelle Erarbeitung der Änderungskonzepte zu bieten. Hierfür ist es notwendig, dass die Analyse schnell und automatisiert die wichtigsten potenziellen Auswirkungen der Änderung aufzeigt, damit diese anschließend in der Diskussion des SE-Teams fokussiert besprochen werden können. Vor diesem Hintergrund wurde von dem Änderungsmanager des Unternehmens das Analysemodul 1.2 für die Wirkungsanalyse ausgewählt.

Im Rahmen des regelmäßigen Treffens des SE-Teams wird in Anlehnung an Modul 2.2 auf Basis von Modul 1.2 in offener Diskussion ein favorisiertes Änderungskonzept inklusive einer Maßnahmenliste erarbeitet.

Tabelle 7.3: Festlegung der Rahmenbedingungen in der Erfolgsevaluation

Frage	Antwort
Unternehmens-/Systembezogene Umstände	
Kann das betrachtete System von einzelnen Expert*innen vollumfänglich verstanden werden oder ist für eine ganzheitliche Analyse eine Abstimmung mit einer Vielzahl an Expert*innen notwendig?	<i>Um eine ganzheitliche Analyse des Systems durchzuführen, sind in etwa fünf bis zehn Expert*innen der Kernbereiche Fertigung, Logistik, Montage, Karosseriebau, Entwicklung, Produktionssteuerung, Prozessplanung und Qualitätsmanagement notwendig.</i>
Sind die notwendigen Expert*innen für die Analyse der Änderungen einfach, verlässlich und am besten simultan verfügbar?	<i>Die Expert*innen sind zeitlich schwer und nur kurz verfügbar. Grundsätzlich ist eine Anwesenheit in den regelmäßigen kurzen Abstimmungsterminen des SE-Teams für alle möglich.</i>
Welche Modelle/Prozessdokumentationen liegen über das System vor?	<i>Wertstromanalyse des betrachteten Bereichs, Liste der relevanten Bauteileigenschaften für die additive Fertigung</i>
Welche Schritte folgen im Änderungsmanagementprozess der Analyse der Änderungsauswirkungen?	<i>Iteration mit der Konzeptdiskussion und Erstellung, Detailanalyse durch die betroffenen Bereiche und anschließende Entscheidung über die Genehmigung der Änderung</i>
Welche Informationen müssen für eine erfolgreiche Umsetzung dieser Schritte vorliegen?	<i>Übersicht der betroffenen Bereiche mit Information über die wichtigsten zu analysierenden Themenpunkte/Elemente</i>
Prozessbezogene Aspekte	
Welche Schritte des Änderungsmanagementprozesses wurden bereits vor der Analyse durchgeführt?	<i>Analyse der Änderungsursache und Formulierung des Änderungsbedarfs</i>
Was ist über die Änderung somit schon bekannt?	<i>Änderungsursache und zu ändernde Bauteileigenschaft(en)</i>
Anwendungsfallbezogene Gegebenheiten	
Wie häufig müssen Änderungen analysiert werden?	<i>mehrere Änderungsanträge pro Woche</i>
Wie viel Zeit ist für die Durchführung der Analyse verfügbar?	<i>regelmäßiger einstündiger Diskussionstermin des SE-Teams zur Diskussion der vorliegenden Änderungsanträge</i>
Wie umfangreich sind die Änderungen, welche bewertet werden müssen?	<i>Kleinere bis mittlere Produktänderungen oder neue Varianten</i>

7.2 Erfolgsevaluation in der industriellen Praxis

Frage 1	Welche der folgenden Informationen liegen über die Änderung/en zu Beginn der Analyse bereits vor? (Multiple-Choice)	
Bedingungen	- keine -	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Änderungsursache: Kenntnis über den äußeren Einflussfaktor (Rezeptor) und dessen Veränderung, welche den Änderungsbedarf hervorruft	Grundlage für die Durchführung von Zielsetzung 1 vorhanden

Frage 2	Sollen die Kosten für die Planung und Umsetzung der Änderung/en bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1f und/oder 1g nicht ausgewählt.	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 5 notwendig

Frage 3	Soll die benötigte Dauer für die Umsetzung der Änderung/en bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1h nicht ausgewählt	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 6 notwendig

Frage 4	Sollen die zu erwartenden Auswirkungen der Änderung/en der Produktionskennzahlen der Fabrik bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	1i nicht ausgewählt	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
b)	Nein	Zielsetzung 4 nicht notwendig

Frage 8	Sollen die zur Adressierung des Änderungsbedarfs benötigten Änderungen bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	Weder 2a) noch 3a) noch 4a) noch 1e) noch 1d)	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
a)	Ja	Zielsetzung 2 benötigt

Frage 9	Sollen die benötigten Änderungen aufgrund von Änderungsfortpflanzung bestimmt werden? (Single-Choice)	
Bedingungen	8a) und 1c)	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
b)	Nein	Zielsetzung 3 nicht notwendig

Frage 10	Sollen vor Beginn der Identifikation von Änderungsmaßnahmen eindeutige Änderungsbedarfe identifiziert werden oder reicht eine Kenntnis der potenziell betroffenen Elemente aus? (Single-Choice)	
Bedingungen	8a) und nicht 1c)	
	Antwortmöglichkeiten	Bedeutung für die Auswahl der Zielsetzungen und Analysemodule
b)	Betroffene Elemente reicht aus	Falls 1b), Zielsetzung 1 nicht notwendig. Falls nicht 1b), Zielsetzung 1 notwendig

Abbildung 7.9: Identifikation der relevanten Module bzw. Bereiche – Erfolgsevaluation

Schritt d) Erstellung des fallspezifischen Analyseverfahrens und der benötigten Dokumente

Zur Vorbereitung der Analyse gilt es, die DMMs zur Vernetzung der änderbaren Produkteigenschaften (Rezeptor) mit dem Produktionssystem vorzunehmen. Als relevante Bereiche der Produktion wurden von den Mitarbeitenden in Anlehnung an die Organisationsstruktur des Unternehmens Fertigungsprozesse, Prozesse und Systeme, Organisation, Dokumente und Personen/Aufgaben unterschieden. Um eine möglichst detaillierte und spezifische Diskussion zu erreichen, wurden die Themenfelder sofern nötig weiter untergliedert:

- **Fertigungsprozesse:** Selektives Laserschmelzen (SLM), Entpackungsstation, Wärmebehandlung, Vereinzeln, Gleitschleifen, Waschen, Prägen, Zusammenbau und Verpacken
- **Prozesse und Systeme:** Logistik, Handhabung, Karosseriebau und Montage
- **Organisation:** Logistikkonzept und Produktionskonzept
- **Personen/Aufgaben:** Absicherung, Entwicklung, Fertigungssteuerung Logistik, Karosseriebau, Montage, Prozessplanung Produktion und Qualität

Als Detaillierungsebene für die Betrachtung des Produkts wurden konkrete Produkteigenschaften, welche einen Einfluss auf die additiven Fertigungsprozesse haben, gewählt. Die Bereiche des Produktionssystems sollen auf der Prozess-/Anlagenebene durch relevante Prozessparameter, Systemelemente, Dokumente und Planungskonzepte spezifiziert werden. Die Abhängigkeiten werden abschließend durch die Kritikalität von 1 (geringer Einfluss) bis 3 (starker Einfluss) dokumentiert.

Mit den jeweiligen Expert*innen der einzelnen Produktionsbereiche-/aufgaben wurden auf diesem Weg 23 DMMs befüllt. Ein Ausschnitt der befüllten DMM „Produkt-Montage“ ist in Abbildung 7.10 dargestellt.

Im Rahmen der Regeltermine zur Besprechung der Änderungen soll die automatisierte Auswirkungsanalyse des Moduls 1.2 in Iteration mit der offenen Diskussion der Expert*innen erfolgen. Des Weiteren werden die Analyseergebnisse bereits vor dem Termin von der*dem Änderungsmanager*in versendet, um den Expert*innen die Möglichkeit zu geben, sich auf die Abstimmung vorzubereiten. Für die gleichzeitige Analyse aller DMMs wurde das Excel-Template des Analysemoduls erweitert (siehe

		Automatisierung	Material und Stückzahlflexibilität	Zuverlässigkeit Prozessfähigkeit	Verfügbarkeit Störung	Prozesszeit Bearbeitungszeit	Personalbedarf	Montageablauf
Kategorien	Produkteigenschaften							
geometrische Eigenschaften	Länge / Breite BB (Y/ X)	3	2	1	1	2	2	3
	Höhe BB (Z)	3	2	1	1	2	2	3
	Material (Volumen)	2		1	1	2	2	3
	Stützstrukturen							
	Überhang							
	Radlen	1						3
	Bohrungsdurchmesser	1						3
	Bohrungsart und -lage	1				2	2	3
	min. Feature-Größe	1						3
	Feature Lage	1						3
technologische Eigenschaften	Funktionsfläche (Magenta)							
	Plattformanbindung							
	Toleranzen (Passungen)	2		2	2	2	2	3
	Rauhigkeitswert							
	Überlappung / Abstand BB in X							
	Überlappung / Abstand BB in Y							
Produktverträglichkeit	Werkstoff	1	2			1	1	3
	Mechanische Kennwerte							
	Zusammenbau (Standardisierung)	2						3
Spezifikationen Kunden	Emissionen							
	Gefährdungspotential							
	Immissionsempfindlichkeit							
Spezifikationen Kunden	Liefertermin Kunde							
	Losgröße Bauplattform							
	Stückzahl Kunde							

Abbildung 7.10: Auszug aus der befüllten DMM „Produkt-Montage“ der Auto AG

Abbildung 7.11). Der zeitliche Aufwand für die Erstellung der benötigten Dokumente ist in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

7.2.2 Durchführung der individuellen Analyse

Die erzeugte Analyse der Auswirkungen von Produktänderungen auf das Produktionssystem der additiven Fertigung wurde in mehreren Regelterminen der Auto AG erfolgreich eingesetzt. Im Folgenden wird die Analyse der Feature-Größe eines Bauteils (siehe Abbildung 7.11) zur Sicherung der Herstellbarkeit als Beispiel für eine der untersuchten Änderungen betrachtet.

Die Auswertung der DMMs lieferte die in Abbildung 7.11 dargestellten Ergebnisse. Diese konnten von dem*der Änderungsmanager*in bereits vor dem Regeltermin an die relevanten Expert*innen versendet werden.

Tabelle 7.4: Zeitaufwand zur Konfiguration und Vorbereitung der fallspezifischen Auswirkungsanalyse in der Auto AG

Tätigkeit	Zeitaufwand [Min.]
Schritt 1: Rahmenbedingungen und Ziele	15
Schritt 2: Auswahl Zielsetzungen	10
Schritt 3: Auswahl Analysemodule und Automatisierungsgrad	10
Schritt 4	
Analysemodul 1.2: Erstellung der DMMs	ca. 60 Minuten pro DMM (Änderungsmanager*in und Expert*in); Insgesamt 23 Stunden Terminzeit bzw. 46 Personenstunden
Summe	2.795 Minuten bzw. 47 Stunden

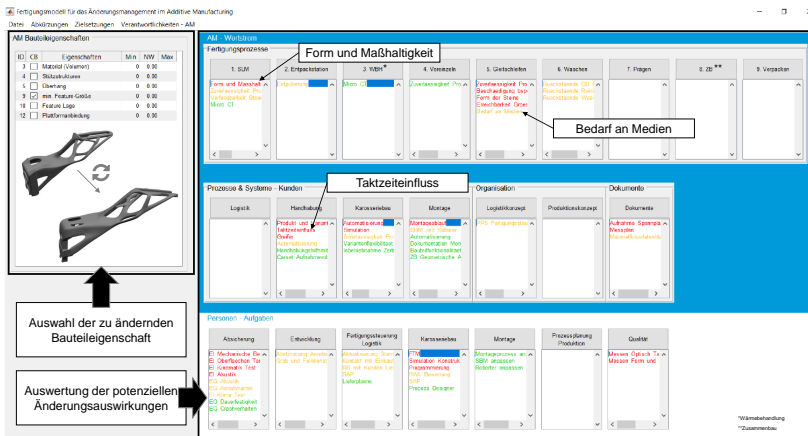


Abbildung 7.11: Auswirkungen einer Änderung der „Feature-Größe“. Rot entspricht einer starken Auswirkung (3), orange einer mittel starken Auswirkung (2) und grün einer geringen Auswirkung (1)

Zu Beginn des Termin erfolgt zunächst eine Prüfung der Vollständigkeit und Korrektheit der Auswirkungen. Anschließend wurde durch die Expert*innen jedes Bereichs festgelegt, welche Abhängigkeiten zu einer konkreten Auswirkungen und einem Änderungsbedarf führen. Dabei wurden die Auswirkungen auf die Form und Maßhaltigkeit

sowie die Zuverlässigkeit des SLM-Prozesses, die Erreichbarkeit und die Form der Steine des Gleitschleifens⁸ sowie die Zuverlässigkeit der Verschraubung im Zusammenbau als kritisch bewertet. Basierend hierauf wurden Maßnahmen zur Anpassung bzw. zur Gestaltung der Produktänderung festgelegt, um die Änderungsauswirkungen zu begrenzen bzw. zu eliminieren. Die finale Auswirkungs- und Maßnahmenliste der angedachten Änderung der Feature-Größe ist in Abbildung 7.12 dargestellt.



Abbildung 7.12: Feature-Größe – Auswirkungen und Maßnahmen

Die Begleitung des Änderungsprozesses durch das Analysemodul 1.2 konnte mit der strukturierten und automatisierten Bestimmung der wichtigsten Abhängigkeiten eine bessere Moderation der Diskussionen sowie eine Beschleunigung der Konzeptentwicklung ermöglichen. In einem nächsten Schritt wird die Spezifizierung von mathematischen Bedingungen, wie sie in Analysemodul 1.3 vorgesehen ist, als sinnvolle Erweiterung der DMMs für ausgewählte Eigenschaften angesehen, da hierdurch eine weitere Automatisierung der Vorbewertung und Auswahl von Änderungskonzepten erreicht werden könnte.

⁸ Das Gleitschleifen dient in der Prozesskette der additiven Fertigung zur Oberflächennachbearbeitung (Entgraten, Glätten, etc.) (MÖHRLE 2018, S. 17; PRÜLLER 2018, S. 1). Beim Gleitschleifverfahren wird das Werkstück mit Schleifkörpern (auch Steine oder Chips genannt) und einer wässrigen Compound-Lösung in einen rotierenden oder vibrierenden Behälter gegeben (PRÜLLER 2018, 2 f.). Die Schleifkörper gleiten durch die Bewegung über die Oberfläche des Werkstücks und tragen dabei in Abhängigkeit von der Korngröße des Schleifmaterials, der Art der Maschine und deren Einstellungen Material vom Werkstück ab.

7.3 Bewertung der entwickelten Methodik

7.3.1 Bewertung des Erfüllungsgrads der Anforderungen

In Abschnitt 4.2 wurden sowohl allgemeine als auch spezifische Anforderungen an die modulare Gestaltung der Auswirkungsanalyse von Änderungen im Kontext der Produktion definiert, welche im Folgenden hinsichtlich ihrer Erfüllung bewertet werden. Eine Übersicht der resultierenden Bewertung der Anforderungen ist in Abbildung 7.13 zusammengestellt.

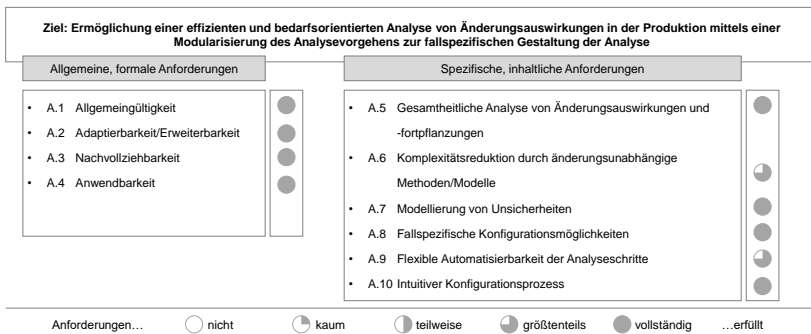


Abbildung 7.13: Bewertung der Erfüllung der an die Lösung gestellten Anforderungen

7.3.1.1 Bewertung der allgemeinen, formalen Anforderungen

A 1 Allgemeingültigkeit: Um die Allgemeingültigkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurden alle Lösungsbausteine brachenunabhängig entwickelt. Die Eingrenzung des Betrachtungsbereichs auf zyklische Änderungen in der Serien- und Massenproduktion wurde sowohl in der modularen Gestaltung der Auswirkungsanalyse als auch bei der Wahl der Evaluationsfälle berücksichtigt. Der festgelegte Fokus auf die Produktionssystemebenen Fabrik und deren Elemente kam bei allen Modellierungen wie z. B. der graphenbasierten Fabrikmodellierung (siehe Abschnitt 5.3.3) zum Tragen.

A 2 Adaptierbarkeit/Erweiterbarkeit: Um eine Adaptierung bzw. eine Erweiterung der Methodik zu ermöglichen, wurde insbesondere die Gestaltung der Modulari-

sierung und der Analysemodule detailliert und strukturiert vorgenommen. Es ist somit ohne Weiteres möglich, Modulinhalt anzupassen oder neue Module nach dem gleichen Vorgehen (siehe Kapitel 5) hinzuzufügen, um somit beispielsweise weitere Zielgrößen in die Modularisierung sowie den Konfigurationsprozess (siehe Kapitel 6) zu integrieren.

A 3 Nachvollziehbarkeit: Um die Nachvollziehbarkeit zu gewährleisten, wurden einerseits die Schnittstellen zwischen den Modulen und andererseits der Konfigurationsprozess detailliert betrachtet. Zudem wurde auf einen durchgängigen Informationsfluss geachtet. Bei der Methodenauswahl für die Analysemodule wurden gut verständliche, dokumentierbare und visualisierbare Methoden gewählt, welche zudem die Nachvollziehbarkeit der Analyseergebnisse sicherstellen.

A 4 Anwendbarkeit: Um die Anwendbarkeit in der industriellen Praxis sicherzustellen, wurden die Analysemodule jeweils mit Hilfsmitteln wie beispielsweise Excel- oder Visio-Vorlagen versehen. Des Weiteren erfolgt die Konfigurationsmethode entlang von standardisierten Fragebögen (siehe Kapitel 6), welche weder eine vorherige, aufwendige Einarbeitung noch eine spezielle Expertise für die Beantwortung erfordern. Abschließend wurde die Anwendbarkeit durch die Durchführungen in der Lernfabrik des *iwb* der TUM sowie im industriellen Umfeld unter Beweis gestellt. Durch eine Weiterentwicklung der bereitgestellten Werkzeuge könnte die für die Anwendung benötigte Zeit dennoch weiter reduziert werden.

7.3.1.2 Spezifische, inhaltliche Anforderungen

A 5 Gesamtheitliche Analyse von Änderungsauswirkungen und -fortpflanzungen: Um das gesamte Spektrum an relevanten Änderungsauswirkungen zu identifizieren, wurde eine umfangreiche Literaturrecherche vorgenommen, in welcher die Zielgrößen und Analyseinhalte bestehender Methoden zusammengefasst wurden. Zudem wurden die Ergebnisse durch mehrere industrielle Fallbeispiele und Befragungen abgesichert und ergänzt. Die finale Übersicht an möglichen Zielsetzungen der Änderungsauswirkungsanalyse aus Abschnitt 5.1 als Sammlung der möglichen Auswirkungen definiert den Rahmen der Modularisierung und die möglichen Analyseinhalte.

A 6 Komplexitätsreduktion durch änderungsunabhängige Methoden/Modelle:

Die Modellierungsmethoden der Analysemodule wurden so gewählt, dass ein möglichst großer Anteil der Analyse durch eine einmalige, allgemeine Modellierung ermöglicht und ggf. automatisiert werden kann. Dies erfolgt durch die Modellierung von änderungsunabhängigen Abhängigkeiten zwischen den betrachteten Systemelementen. Während dies vor allem in den Analysemodulen der Zielsetzungen 1, 3 und 4 mit der Nutzung von DMMs, graphenbasierter Fabrikmodellierung, Kennzahlen-Rechensystem und Cognitive Map vollständig ermöglicht wurde, wird der Anteil an änderungsspezifischen Bewertungen durch Expert*innen in den Modulen der Zielsetzungen 5 und 6 als weiter optimierbar angesehen. Auch wenn die Kosten-, Aufwand- und Dauerpositionen in der Vorbereitung unternehmensspezifisch eingeschränkt werden, müssen bei jeder Durchführung alle Positionen durch die Anwendenden festgelegt werden. Es sollte untersucht werden, ob durch eine vorherige Klassifikation von Änderungen – beispielsweise auf Basis von historischen Daten sowie geeigneten Änderungsmerkmalen – eine einmalige Bewertung der Kosten-, Aufwand- und Dauerpositionen pro Änderungsklasse in der Vorbereitung möglich ist. Somit könnte der Aufwand der Analyse in diesen Modulen durch eine änderungsunabhängige Modellierung nochmals verringert werden.

A 7 Modellierung von Unsicherheiten: Die Art und Weise, nach welcher mit Unsicherheiten in der Bewertung von Änderungen umgegangen wird, hängt unter anderem von dem vorhandenen Wissen über die Änderung und der Verfügbarkeit von Expert*innen ab. Diese Rahmenbedingungen werden innerhalb der Konfigurationsmethode abgefragt. Anschließend wurden verschiedene Möglichkeiten für die Modellierung von Unsicherheiten in Form der Genauigkeiten der Analysemodule in die Modularisierung integriert.

A 8 Fallspezifische Konfigurationsmöglichkeiten: Die Modularisierung der Wirkungsanalyse wurde auf Basis der möglichen Zielsetzung der Analyse durchgeführt. Dies stellt sicher, dass die Nutzenden eine direkte Verknüpfung zwischen ihrem Anwendungsfall und den Analysemodulen herstellen können. Durch die Abstufungen der möglichen Analysegenauigkeit und des Automatisierungsgrads ist es möglich, unterschiedliche Rahmenbedingungen wie beispielsweise die verfügbare Zeit zur Durchführung der Analyse, die Komplexität des Pro-

duktionssysteme oder die Häufigkeit der Änderungen bei der Konfiguration zu berücksichtigen.

A 9 Flexible Automatisierbarkeit der Analyseschritte: Durch die unterschiedliche Detaillierung der Modellierung in den einzelnen Modulen kann eine Balance zwischen Modellierungsaufwand und Automatisierungsgrad erreicht werden. Jedoch ist weiterhin vor allem in den Modulen der Zielsetzungen 2, 5 und 6 in jedem Fall eine Beteiligung von Expert*innen bei der Analyse notwendig. Auch wenn durch die Verlagerung des Aufwands in die einmalige Vorbereitung der Auswirkungsanalyse der Aufwand pro Analyse reduziert werden kann, ist eine weitere Automatisierung beispielsweise durch die datenbasierte Bestimmung von Änderungskosten durch einen Vergleich mit vergangenen Änderungsprozessen anzustreben.

A 10 Intuitiver Konfigurationsprozess: Um die Konfiguration der individuellen Auswirkungsanalyse intuitiv zu gestalten, wurden zur Unterstützung des vierstufigen Prozesses zwei Fragebögen – einerseits für die Aufnahme der Rahmenbedingungen und andererseits für die Identifikation der relevanten Module – entwickelt (siehe Kapitel 6). Des Weiteren sind die Aufgaben der Vorbereitung in den Analysemodulen klar von den bei einer Analyse durchzuführenden Schritten getrennt (siehe Kapitel 5).

7.3.2 Bewertung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses

Nachdem die entwickelte Methodik im vorherigen Abschnitt hinsichtlich der gestellten Anforderungen bewertet wurde, soll im Folgenden auf das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei der Anwendung eingegangen werden. Hinsichtlich der Vorteile der Lösung sind sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte zu nennen.

Zu den quantitativen Punkten zählen primär die Zeiteinsparungen im Rahmen der Auswirkungsanalyse. Diese werden einerseits durch die bedarfsorientierte Gestaltung der Methode, wodurch nicht zielführende Tätigkeiten reduziert werden, und andererseits durch das strukturierte, teilautomatisierte und somit effizientere Vorgehen innerhalb der Analysebausteine erreicht. Während ersteres nur bedingt analysiert werden konnte, da hierfür eine Beobachtung der Konzeption und Durchführung der Auswirkungsanalyse in einem Unternehmen mit und ohne Verwendung des Gesamtkonzepts notwendig

wäre, konnte insbesondere zweiteres im Rahmen der Evaluationen festgestellt werden. Der qualitative Nutzen der Methodik liegt in der Dokumentation von Expertenwissen über die Abhängigkeiten im Produktionssystem, der Transparenz über und der Nachvollziehbarkeit von Änderungsauswirkungen sowie der höheren Kontinuität und Ergebnisqualität der Auswirkungsanalyse.

Die Durchführung der Auswirkungsanalysen wird sowohl in der Literatur (siehe Kapitel 3) als auch in der Industrie (siehe SIPPL ET AL. (2021)⁹) als wichtiger Schritt des Änderungsmanagements angesehen und sollte somit in jedem Fall durchgeführt werden. Wie angesprochen ist hier eine Verbesserung durch die Generierung des Analyseverfahrens nach der entwickelten Methodik zu erwarten. Dementsprechend kann der Aufwand zur Umsetzung der Methode anhand der Dauer des Konfigurationsprozesses bewertet werden.

Die Aufwände in den Evaluationsfällen sind in den Tabellen 7.2 und 7.4 aufgelistet. Sie verteilen sich auf die Festlegung von Rahmenbedingungen und Zielsetzung, die Ergebnisauswahl, die Auswahl der Analysemodule und des Automatisierungsgrads sowie die Erstellung des fallspezifischen Analyseverfahrens und der benötigten Dokumente. Während die ersten drei Schritte durch die Fragebögen gut geführt und effizient gestaltet werden konnten, ist die Erstellung und Vorbereitung von änderungsunabhängigen Modulen der größte Zeitfaktor, welcher auch mit der Komplexität und dem Umfang des Produktionssystems ansteigt. Darin lässt sich auch der Fokus der Methodik auf die änderungsunabhängige Modellierung als Basis für wiederholte Auswirkungsanalysen erkennen, welche die Verlagerung der Aufwände von der Durchführung der Analyse in die vorbereitende Modellierung bedingt. Es gilt, diese Aufwände durch die effizientere Analyse zu kompensieren. Wird im Fall der Erfolgsevaluation bei der Auto AG von einer Anzahl von drei Änderungsanfragen pro Woche ausgegangen, wird beispielsweise eine Zeiteinsparung pro Analyse von ca. 18 Minuten angestrebt, um die Aufwände der Vorbereitung innerhalb des ersten Jahres der Anwendung aufzuholen. Im Vergleich zu den Beobachtungen aus der Anwendung erscheinen diese Verkürzungen durch die Teilautomatisierung und strukturierte Termingestaltung realisierbar. Zudem ist hervorzu-

⁹ In der Studie von SIPPL ET AL. (2021) gaben 88 % der 34 befragten Personen an, Änderungsauswirkungen zu analysieren. 56 % der Befragten stellen fest, dass das Eintreten unvorhergesehener Änderungsauswirkungen zu Problemen führt.

heben, dass in dieser Kalkulation alle weiteren qualitativen Vorteile nicht berücksichtigt werden.

7.3.3 Kritische Diskussion der entwickelten Methodik

Die in den vorausgegangenen Abschnitten durchgeführte Evaluation der Methodik zeigt, dass die in Abschnitt 4.2 formulierten Anforderungen nahezu vollständig erfüllt werden konnten. Darüber hinaus kann für die durchgeführten Evaluationsanwendungen von einem positiven Aufwand-Nutzen-Verhältnis ausgegangen werden, welches ein Indiz für die wirtschaftliche Anwendbarkeit der Methodik darstellt. Die in der Erarbeitung der einzelnen Bausteine der Methodik gewonnenen Erkenntnisse erweitern zudem den existierenden Stand der Forschung. Als zentrale Neuerung ist in diesem Zusammenhang die Modularisierung der Auswirkungsanalyse zu nennen, welche eine individuelle Analyse je nach Unternehmen und Anwendungsfall ermöglicht. Mit Hilfe des durch Fragebögen und Templates unterstützten Konfigurationsvorgehens kann die Vorbereitung der Analyse zielorientiert erfolgen. Die ausgewählten Analysemethoden jedes Moduls stellen neue Vorgehensweisen für die schrittweise und teilautomatisierte Auswirkungsanalyse zur Verfügung, um letzten Endes eine nachvollziehbare und ganzheitliche Entscheidungsgrundlage für das Änderungsmanagement zu liefern.

Neben den positiven Aspekten und Stärken der Methodik sind allerdings auch Grenzen und Risiken des Einsatzes der entwickelten Methodik zu nennen.

Zeitaufwand für die Erstellung der notwendigen Modelle

Durch die Verlagerung der Modellierungsaufwände in eine einmalige Vorbereitung ist die Initialisierung der Methode ggf. mit einem hohen Aufwand verbunden. In der Anwendungsevaluation wurde erkennbar, dass dies vor allem für die graphenbasierte Darstellung des Produktionssystems zur Analyse von Änderungsförpflanzungen gilt (siehe Tabelle 7.2). Die Erfolgsevaluation zeigt zudem, dass auch die Erstellung von detaillierten DMMs für die Analysemodule 1.1 bis 1.3 bei komplexen Abhängigkeiten zwischen Produkt, Prozess und Ressource einen umfangreichen Zeitaufwand mit sich bringt (siehe Tabelle 7.4). Somit ist eine kurzfristige Nutzung der Methode nicht gut umsetzbar, was die in Abschnitt 1.3 festgelegte Eingrenzung des Betrachtungsbereichs auf zyklische Änderungen, bei welchen die Methodik und die Modellierung einen wiederkehrenden Vorteil liefern, bedingt. Dennoch besteht in diesen Fällen das

Risiko, dass auf noch vorhandene Expert*innen und deren Erfahrung aus vorherigen Änderungsprozessen zurückgegriffen wird, anstatt ein methodisches Vorgehen durchzuführen. Aus diesem Grund ist es notwendig, die vorbereitenden Zeitaufwände durch eine Weiterentwicklung der Modellierungswerkzeuge zu reduzieren, um diese Grenze der Anwendbarkeit zu lösen.

Benötigtes Expertenwissen und kontinuierliche Pflege der Modelle

Zudem ist für die vorbereitende Modellierung weiterhin Expertenwissen gefragt, wodurch die Analysequalität wiederum durch die Qualität dieses Wissens beeinflusst wird. Durch die strukturierte Erfassung von Abhängigkeiten kann jedoch sichergestellt werden, dass implizites Wissen in verständlicher Form dokumentiert wird und von jeder Person für die Auswirkungsanalyse genutzt werden kann. Zusammenfassend ist die Methodik zwar von Expertenwissen abhängig, stellt dieses aber auch in den wiederkehrenden Analysefällen zur Verfügung. Dennoch gilt es, die Modelle durchgängig aktuell zu halten, um keine Analyseergebnisse auf Basis eines veralteten Wissensstandes zu generieren. Vor allem nach der Durchführung von Änderungen, müssen die Anpassungen in der retrospektiven Phase des MCM wieder in die erstellten Modelle zurückgeführt werden. Sowohl zur objektiveren Modellierung als auch zur kontinuierlichen Pflege der Modelle ist eine datenbasierte Unterstützung der Modellerstellung möglich, um diese Limitationen zu adressieren.

Ausstehende umfassende Evaluation der Methodik

Im Sinne des Forschungsvorhabens des Typs 3 nach BLESSING & CHAKRABARTI (2009) wurde im Rahmen dieser Arbeit lediglich eine initiale Evaluation der entwickelten Lösung durchgeführt. In den Evaluationsanwendungen wurden zunächst nicht alle Einsatzmöglichkeiten der Methode geprüft. So wurden beispielsweise nur die Rezeptoren „Produkt“ und „Technologie“ als Änderungsursachen und Eingang für die Analysemodule der Zielsetzung 1 betrachtet, weshalb die Anwendbarkeit der Methodik auf weitere Rezeptoren in weiteren Fallstudien erprobt werden sollte. Da Produkt- und Technologieänderungen zu den häufigsten Änderungsursachen in der Produktion zählen (KOCH & HOFER 2016), konnten im Rahmen der Evaluation zumindest für einen signifikanten Teil der potenziellen Anwendungsfälle die Funktionalität und der Nutzen der Methodik aufgezeigt werden.

Die Anwendungsevaluation erfolgte in einer Lernfabrik, welche mit einem realen Produkt und industriellen Betriebsmitteln die Prozesse eines Montagesystems zwar ausreichend abbildet, aber vor allem bzgl. der Produktionslogistik und der IT-Infrastruktur vereinfachte Prozesse aufweist. Somit konnte das übergeordnete Ziel der Anwendungsevaluation – Bewertung der Nutzbarkeit und Anwendbarkeit der Methodik – erreicht werden. Die Ergebnisse lassen im Gegensatz zur Erfolgsevaluation jedoch nur bedingt Rückschlüsse auf die Nützlichkeit bzw. die Vorteile und die Wirtschaftlichkeit der Anwendung in der Industrie zu. Die durchgeführte Erfolgsevaluation liefert diesbezüglich erste Erkenntnisse, umfasst aber derzeit nur einen Anwendungsfall und bildet das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten der Lösung nicht vollumfänglich ab. Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse gilt es dementsprechend, bestenfalls nach einer Weiterentwicklung der Analysewerkzeuge und damit einer Verringerung der Modellierungsaufwände, die Evaluation umfassend abzuschließen.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Zyklische Einflussfaktoren im Umfeld von produzierenden Unternehmen führen zu regelmäßigen Änderungsbedarfen im Produktionssystem. Um diesen Bedarfen nachzukommen, muss das Änderungsmanagement – auch als Manufacturing Change Management (MCM) bezeichnet – eine effiziente und schnelle Umsetzung von Anpassungen ermöglichen. Einen essentiellen Bestandteil des MCM stellt hierfür die Analyse von Änderungsauswirkungen dar. Durch die Identifikation von Änderungsbedarfen, betroffenen Fabrikelementen und notwendigen Änderungen sowie die Bewertung der Änderungsdauer, der Änderungskosten und der Auswirkungen auf Produktionskennzahlen liefert eine Analyse von Änderungsauswirkungen unter anderem die Informationsgrundlage für die Ressourcen- und Zeitplanung einer Änderung.

Für unterschiedliche MCM-Prozesse der Forschung und der industriellen Praxis wird eine Analyse von Änderungsauswirkungen in verschiedensten Fällen mit zahlreichen Ausprägungen hinsichtlich Rahmenbedingungen, Zielsetzung, Analysemethoden, etc. durchgeführt. Somit besteht die Herausforderung, für die individuellen Prozesse und Anwendungsszenarien die richtige Vorgehensweise für die Änderungsauswirkungsanalyse zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund ist es das Ziel dieser Arbeit, eine effiziente und bedarfsorientierte Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion mittels einer Modularisierung des Analysevorgehens zur fallspezifischen Gestaltung der Auswirkungsanalyse zu ermöglichen.

Die Zielsetzung wurde anhand von drei forschungsleitenden Fragen strukturiert, zu deren Beantwortung die Forschungsmethodik der Design Research Methodology (DRM) verfolgt wurde (Kapitel 1). Um ein vertieftes Verständnis der Problemstellung zu erzeugen, wurden die notwendigen Grundlagen des MCM, der Analyse von Änderungsauswirkungen und der Modellierung von Produktionssystemen beschrieben sowie die dadurch

bestehenden Herausforderungen für die Auswirkungsanalyse im Kontext der Produktion zusammengefasst. Auf Basis des Stands der Wissenschaft und Technik hinsichtlich bestehender Lösungsansätze wurde anschließend der Handlungsbedarf dieser Arbeit abgeleitet und die Forschungshypothese formuliert (Kapitel 3). Die Methoden des Process Tailoring und der Prozessmodularisierung bilden die Basis für die Lösungsentwicklung, welche durch die in Kapitel 4 konkretisierten Forschungsfragen und die allgemeinen sowie spezifischen Anforderungen geleitet wird.

Die im Rahmen der Arbeit entwickelte Methodik wurde in die Beschreibung der Analysemodule (Kapitel 5) und die Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Analyseverfahrens (Kapitel 6) unterteilt. Zur Prozessmodularisierung wurden zunächst die Analysemodule durch die einzelnen Zielsetzungen der Auswirkungsanalyse und die Unterscheidung verschiedener Ergebnissenauigkeiten festgelegt (siehe Abschnitt 5.1). Für jedes Analysemodul wurde anschließend der Prozess zu dessen Vorbereitung sowie dessen Durchführung detailliert beschrieben (Abschnitt 5.3). Die Konfigurationsmethode in Kapitel 6 umfasst die Konfigurationslogik zu den Zusammenhängen der Analysemodule sowie ein darauf aufbauendes, vierstufiges Vorgehen. In diesem erfolgen die durch Fragebögen gestützte Auswahl der Analysemodule sowie die Ableitung und Vorbereitung des individuellen Analyseprozesses. Die Methodik wurde einerseits zur Analyse von Bauteil- und Technologieänderungen in der Lernfabrik für schlanke Produktion (LSP) des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) und andererseits zur Analyse von Produktänderungen in der Automobilindustrie angewendet. Dabei konnten die individuellen Prozesse der Anwendungsfälle und deren Änderungsmanager*innen durch das bedarfsorientierte und strukturierte Vorgehen unterstützt werden. Abschließend wurde die Methodik hinsichtlich der in Kapitel 4 formulierten Anforderungen sowie des zu ihrer Durchführung notwendigen Aufwands und des zu erzielenden Nutzens evaluiert.

8.2 Ausblick

Im Zuge der Erarbeitung der Methodik zur Erstellung eines fallspezifischen Analyseverfahrens für die Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion konnten weitere Untersuchungsbereiche identifiziert werden, die als geeigneter Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten angesehen werden. Diese werden im Folgenden kurz erläutert.

Bereitstellung von Referenzmodellen

Das jeweilige Modell zur Unterstützung jedes Analysemodul stellt die Basis für die Analyseprozesse dar. Gleichzeitig ist hiermit auch der größte Zeitaufwand und der umfangreichste Bedarf an Fachwissen und Abstraktionsvermögen in der Methodik zur Konfiguration und Vorbereitung des individuellen Analyseverfahrens verbunden. Analog zu der beschriebenen Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungskosten und -aufwänden können sogenannten Referenzmodelle (siehe Abschnitt 2.4) als Startpunkt und Orientierung zur Verfügung gestellt werden, um die Durchführung der Modellierung zu unterstützen und zu beschleunigen. Vor allem für die graphenbasierte Modellierung des Fabriksystems für die Analysemodule 3.1 bis 3.3, welche einen hohen Zeitaufwand mit sich bringt, wird es als möglich erachtet, eine Referenzstruktur ggf. je Produktionsverfahren zu erstellen. Hierdurch kann der Fokus in der Anwendung der Methodik anschließend auf die spezifische Anpassung des Modells auf die eigenen Prozesse gelegt werden, anstatt zunächst die grundlegende Struktur eines Produktionssystems darzustellen. Aber auch für das Kennzahlen-Rechensystem oder die Cognitive Map für die Analysemodule 4.1 bis 4.6 können Referenzmodelle für die gängigsten Kennzahlen eines Produktionssystems, wie z. B. die Kennzahlen des Wertstromkennzahlensystems (siehe Abbildung 5.21), entwickelt werden.

Auswertung von Änderungs- und Produktionsdaten

Das Potenzial der Auswertung von historischen Daten wird in der Produktion bereits in vielen Anwendungsfällen untersucht. Im MCM sind jedoch lediglich Aktivitäten zur Identifikation von relevanten Stakeholdern von SIPPL & REINHART (2021) & SIPPL ET AL. (2022a) vorzufinden. Deutlich mehr Einsatz findet die datenbasierte Analyse von Änderungen im Gegensatz hierzu im ECM (siehe M. WICKEL (2017), LEE & HONG (2017) oder KATTNER (2020)).

Aus der Literatur wird erkennbar, dass die datenbasierte Änderungsanalyse die Auswirkungsanalyse im MCM an mehreren Punkten unterstützen kann. Wie in Abschnitt 7.3 festgestellt, bringen die vorbereitenden Schritte der Analysemodule dieser Arbeit weiterhin einen manuellen Aufwand mit sich. Zudem sind z. B. die dokumentierten Abhängigkeiten in den Modulen der Zielsetzungen 1 und 3 von den Expert*innen des Unternehmens abhängig. Durch die Auswertung von dokumentierten Änderungen und deren Auswirkungen könnte die Identifikation von Abhängigkeiten automatisiert unterstützt werden und somit effizienter und objektiver erfolgen. Des Weiteren könnte

die Bewertung der Kosten, Aufwände und Änderungsdauer durch Referenzwerte von vergangenen Änderungen vereinfacht werden. Zudem wäre es möglich, ausgewählte Modellierungsschritte durch die Auswertung von Produktionsdaten zu initiieren. So könnte beispielsweise die graphenbasierte Fabrikmodellierung auf einer datenbasierten Wertstromanalyse aufbauen. Diese Möglichkeiten würden gleichzeitig dazu führen, dass die datenbasiert bestimmten Inhalte automatisiert aktualisiert werden könnten, was einen reduzierten Pflegeaufwand der Modelle mit sich bringen würde.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit einer datenbasierten Auswertung stellt die retrospektive Auswirkungsanalyse und somit die Überprüfung, ob die prognostizierten Auswirkungen eingetroffen sind, dar. Durch einen Vergleich der Produktionsdaten vor und nach der Umsetzung einer Änderung könnten Rückschlüsse auf deren reale Auswirkungen gezogen werden. Eine besondere Herausforderung liegt hierbei jedoch darin, eindeutige Wirkzusammenhänge zwischen einer Änderung und den Produktionsdaten zu erreichen, da ein Produktionssystem diversen Einflussfaktoren unterliegt.

Zusammenfassend gilt es, die geeigneten Integrationspunkte, Datenquellen und Analyseverfahren für die datenbasierte Unterstützung der Änderungsauswirkungsanalyse zu identifizieren und zu entwickeln.

Referenz-Analyseverfahren im MCM-Referenzprozess

Auch wenn der MCM-Prozess eines jeden Unternehmens unterschiedlich ist, stellt der MCM-Referenzprozess nach KOCH (2017) eine ganzheitliche Orientierung für die Prozessgestaltung dar und beinhaltet die Einsatzmöglichkeiten der Änderungsauswirkungsanalyse. Somit wäre es denkbar, auf Basis der Methodik dieser Arbeit Referenz-Analyseverfahren für jeden relevanten Punkt des MCM-Referenzprozesses zu erstellen, um Unternehmen insbesondere bei der Erstellung sowie der Weiterentwicklung ihres MCM-Prozesses Anhaltspunkte zu liefern.

Änderungsindividuelle Analyse von Änderungsauswirkungen

Die Methodik dieser Arbeit zielt darauf ab, eine individuelle Analyse für unterschiedliche Anwendungsfälle mit wiederkehrenden, vergleichbaren Änderungen zu konfigurieren. Eine variierende Analyse für jede Änderung/Durchführung in einem Anwendungsfall ist dabei nicht vorgesehen. In einem nächsten Schritt könnte betrachtet werden, inwiefern ein konfiguriertes Analyseverfahren noch dynamischer an die Rahmenbedingungen wie die Komplexität einer jeden Änderung oder die verfügbare Zeit bei

gleichbleibender Art der Änderung angepasst werden kann. Hierfür wäre eine schnelle Klassifikation von Änderungen auf Basis eines ersten Änderungsantrags notwendig, welche beispielsweise regelbasiert oder datenbasiert erfolgen könnte.

Umfassende Evaluation

Wie in Abschnitt 7.3 erläutert, sind für eine umfassende Evaluation der Ergebnisse weitere Anwendungen in Form von Erfolgsevaluationen notwendig. Dabei sollten ausreichend industrielle Anwendungsfälle identifiziert werden, um die Umsetzung eines jeden Analysemoduls bzw. mindestens jeweils eines Analysemoduls je Zielsetzung zu ermöglichen. Des Weiteren sollten Anwendungsfälle betrachtet werden, in welchen die Änderungsursachen in den Bereichen Stückzahl, Zeit, Kosten oder Qualität liegen.

Erweiterung der Methodik um zusätzliche Analysemodule

Eine wichtige Anforderung ist die Erweiterbarkeit der Methodik, welche durch die modulare Struktur ermöglicht wird. Somit können auch in zukünftigen Forschungsaktivitäten weitere Analysemodule entwickelt werden, sofern hierfür unter anderem durch neue Einsatzmöglichkeiten und Zielsetzungen der Auswirkungsanalyse oder durch eine detailliertere Untergliederung der einzelnen Tätigkeiten ein Bedarf besteht. Als Beispiel ist in diesem Kontext die Identifikation von Stakeholdern zu nennen, welche im Rahmen dieser Arbeit als indirektes Ergebnis der Identifikation von betroffenen Fabrikelementen und Änderungsfortpflanzungen angesehen wurde.

Die genannten Themen für weitere Forschungsaktivitäten stellen Möglichkeiten dar, wie eine konkrete Weiterentwicklung der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Ergebnisse erfolgen kann. Insbesondere um die Potenziale der zunehmenden Digitalisierung von Prozessen nutzen zu können, ist es für produzierende Unternehmen essentiell, sich mit der Datenstruktur und der datenbasierten Analyse von Prozessen zu befassen. Gerade in Prozessen wie dem Änderungsmanagement in der Produktion, in welchen aktuell keine standardisierten IT-Systeme vorliegen, sollte der Gestaltungsraum für die Datenerhebung gezielt genutzt werden.

Literatur

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Hanser. 2011. URL: <http://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446428058>.

ABELE ET AL. 2019

Abele, E.; Metternich, J.; Tisch, M.: Learning Factories. Cham: Springer International Publishing. 2019.

AHMAD ET AL. 2018

Ahmad, M.; Ferrer, B. R.; Ahmad, B.; Vera, D.; Martinez Lastra, J. L.; Harrison, R.: Knowledge-based PPR modelling for assembly automation. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 21 (2018) 2, S. 33–46.

ARNOLD & FURMANS 2009

Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6. Aufl. 2010. VDI-Buch. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1544165>.

AURICH & MALAK 2010

Aurich, J. C.; Malak, R. C.: Auswirkungsmechanismen technischer Änderungen in der Fertigung: Einsatz regelbasierter Auswirkungsmechanismen zur Steigerung der Beherrschbarkeit technischer Änderungen in der mechanischen Fertigung. wt online 100 (2010) 1/2, S. 15–21.

AURICH & CICHOS 2014

Aurich, J. C.; Cichos, D.: Technische Änderungen in der Produktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 6, S. 395–399.

AURICH & RÖSSING 2007

Aurich, J. C.; Rößing, M.: Engineering Change Impact Analysis in Production Using VR. In: Digital Enterprise Technology. Hrsg. von P. F. Cunha; P. G. Maropoulos. Boston, MA: Springer Science+Business Media LLC. 2007, S. 75–82.

AURICH ET AL. 2004

Aurich, J. C.; Rößing, M.; Jaime, R.: Änderungsmanagement in der Produktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 7-8, S. 381–384.

AXELROD 2015

Axelrod, R.: The analysis of cognitive maps. In: Structure of Decision. Hrsg. von R. Axelrod. Princeton Legacy Library. Princeton, N.J: Princeton University Press. 2015, S. 55–73.

AZAB ET AL. 2013

Azab, A.; ElMaraghy, H.; Nyhuis, P.; Pachow-Frauenhofer, J.; Schmidt, M.: Mechanics of change: A framework to reconfigure manufacturing systems. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 6 (2013) 2, S. 110–119.

BAQAR RAZA & HARRISON 2011

Baqar Raza, M.; Harrison, R.: Design, Development & Implementation Of Ontological Knowledge Based System For Automotive Assembly Lines. International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process 1 (2011) 5, S. 21–40.

BAUER ET AL. 2017

Bauer, H.; Schoonmann, A.; Reinhart, G.: Approach for model-based change impact analysis in factory systems. In: 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). 2017, S. 1–7.

BAUER ET AL. 2018

Bauer, H.; Brandl, F.; Reinhart, G.: Vorgehen zur individuellen Gestaltung der Änderungsauswirkungsanalyse in der Produktion. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 113 (2018) 12, S. 819–823.

BAUER ET AL. 2020

Bauer, H.; Haase, P.; Sippl, F.; Ramakrishnan, R.; Schilp, J.; Reinhart, G.: Modular

change impact analysis in factory systems. *Production Engineering* 14 (2020) 4, S. 445–456.

BEERMANN ET AL. 2015

Beermann, S.; Augart, E.; Schubach, M.: *Workshops: Vorbereiten, durchführen, nachbereiten*. Haufe TaschenGuide. Freiburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG. 2015. URL: https://www.wiso-net.de/document/HAUF_AHAU__9783648077443127.

BERGHOLZ 2005

Bergholz, M. A.: *Objektorientierte Fabrikplanung*. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen University. 2005.

BERGS ET AL. 2020a

Bergs, T.; Hermann, L.; Rey, J.; Barth, S.: Identification of Unintended Effects Caused by Adaptations of Manufacturing Process Sequences for Safety-Critical Components. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 1019–1024.

BERGS ET AL. 2019

Bergs, T.; Hermann, L.; Rey, J.; Barth, S.: Sicherheitskritische Änderungen in der Fertigung: Konzept zur kostenoptimierten Planung von Änderungen in der Fertigung sicherheitskritischer Bauteile. *WT Werkstattstechnik* (2019) 6, S. 442–446.

BERGS ET AL. 2020b

Bergs, T.; Hermann, L.; Rey, J.; Barth, S.: Methodology for the identification of alternative manufacturing changes for safety-critical components. *Production Engineering* 14 (2020) 3, S. 297–307.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

Blessing, L.; Chakrabarti, A.: *DRM, a Design Research Methodology*. Online-Ausg. SpringerLink: Springer e-Books. London: Springer London. 2009.

BLISS 2000

Bliss, C.: *Management von Komplexität*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2000.

BOOCH 1997

Booch, G.: *Object-oriented analysis and design: With applications*. 2. ed., 13. print. The Addison-Wesley object technology series. Reading, Mass.: Addison-Wesley. 1997.

BRAHMA & WYNN 2023

Brahma, A.; Wynn, D. C.: Concepts of change propagation analysis in engineering design. *Research in Engineering Design* 34 (2023) 1, S. 117–151.

BRIEKE 2009

Brieke, M.: *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung*: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2009. Bd. 2009,1. Berichte aus dem IFA. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. 2009.

BRONŠTEJN ET AL. 2008

Bronštejn, I. N.; Semendjaev, K. A.; Musiol, G.; Mühlig, H.; Bronstein, I. N.: *Taschenbuch der Mathematik*. 7., vollst. überarb. und erg. Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch. 2008.

BROWNING 2001

Browning, T. R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. *IEEE Transactions on Engineering Management* 48 (2001) 3, S. 292–306.

CIRP 2012

CIRP: *Dictionary of Production Engineering/Wörterbuch der Fertigungstechnik/Dictionnaire des Techniques de Production Mechanique Vol IV: Assembly/Montage/Assemblage*. 2012. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2012. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-12007-7>.

CISEK 2005

Cisek, R.: *Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen*. Bd. 191. Forschungsberichte IWB. München: Utz. 2005.

CISEK ET AL. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: *Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme*. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002) 9, S. 441–445.

CLARKSON ET AL. 2004

Clarkson, P. J.; Simons, C.; Eckert, C.: Predicting Change Propagation in Complex Design. *Journal of Mechanical Design* 126 (2004) 5, S. 788.

COLLEDANI & ANGIUS 2019

Colledani, M.; Angius, A.: Integrated production and reconfiguration planning in modular plug-and-produce production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68 (2019) 1, S. 435–438.

DANGELMAIER 1999

Dangelmaier, W.: *Fertigungsplanung: Planung von Aufbau und Ablauf der Fertigung Grundlagen, Algorithmen und Beispiele*. VDI-Buch. Berlin & Heidelberg: Springer. 1999. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-98045-9>.

DAVIS 2008

Davis, R.: Teaching Note — Teaching Project Simulation in Excel Using PERT- Beta Distributions. *INFORMS Transactions on Education* 8 (2008) 3, S. 139–148.

DÉR ET AL. 2022

Dér, A.; Hingst, L.; Nyhuis, P.; Herrmann, C.: A review of frameworks, methods and models for the evaluation and engineering of factory life cycles. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering* 4 (2022), S. 100083.

DÉR ET AL. 2023

Dér, A.; Hingst, L.; Nyhuis, P.; Herrmann, C.: Concept for modeling and quantitative evaluation of life cycle dynamics in factory systems. *Production Engineering* 69 (2023), S. 533.

DIN 8580 2022

DIN 8580: *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2022.

DING & JIE 2008

Ding, F.; Jie, L.: An Empirical Study of Flexible Business Process Based on Modularity System Theory. In: 2008 The Third International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology (iccg 2008). IEEE. 2008, S. 37–44.

ECHSLER MINGUILLON ET AL. 2019

Echslér Minguillon, F.; Schömer, J.; Stricker, N.; Lanza, G.; Duffie, N.: Planning for changeability and flexibility using a frequency perspective. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 68 (2019) 1, S. 427–430.

H. A. ELMARAGHY 2009

ElMaraghy, H. A.: Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer London. 2009.

EPPINGER & BROWNING 2012

Eppinger, S. D.; Browning, T. R.: Design structure matrix methods and applications. Engineering systems. Cambridge, Mass: MIT Press. 2012. URL: <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=365529>.

ERLACH 2010

Erlach, K.: Wertstromdesign: Der Weg zur schlanken Fabrik. 2., bearb. und erweiterte Aufl. VDI-Buch. Berlin & New York: Springer. 2010. URL: <http://site.ebrary.com/lib/alltitles/docDetail.action?docID=10408765>.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung. 4., bearbeitete und korrigierte Auflage. Berlin & Heidelberg: Springer. 2002. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=6306735>.

EVERSHEIM & SCHUH 1999

Eversheim, W.; Schuh, G.: Produktion und Management 3: Gestaltung von Produktionssystemen. Hütte. Berlin & Heidelberg: Springer. 1999. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-58399-5>.

K. FELDMANN & REINHART 2000

Feldmann, K.; Reinhart, G., Hrsg. (2000): Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion: Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Springer eBook Collection Business and Economics. Berlin, Heidelberg & s.l.: Springer Berlin Heidelberg. 2000.

S. FELDMANN ET AL. 2014

Feldmann, S.; Kernschmidt, K.; Vogel-Heuser, B.: Combining a SysML-based Modeling Approach and Semantic Technologies for Analyzing Change Influences in Manufacturing Plant Models. Procedia CIRP 17 (2014), S. 451–456.

FRICKE ET AL. 2000

Fricke, E.; Gebhard, B.; Negele, H.; Igenbergs, E.: Coping with changes: Causes, findings, and strategies. *Systems Engineering* 3 (2000) 4, S. 169–179.

GAJEWSKI 2004

Gajewski, T.: Referenzmodell zur Beschreibung der Geschäftsprozesse von After-Sales-Dienstleistungen unter besonderer Berücksichtigung des Mobile Business: Zugl.: Paderborn, Univ., Diss., 2004. Bd. 158. HNI-Verlagsschriftenreihe. Paderborn: HNI. 2004.

GEBHART ET AL. 2016

Gebhart, N.; Kruse, M.; Krause, D.: Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie. In: *Handbuch Produktentwicklung*. Hrsg. von U. Lindemann. München: Hanser. 2016, S. 111–149.

GINSBERG & QUINN 1995

Ginsberg, M. P.; Quinn, L. H.: *Process Tailoring and the Software Capability Maturity Model*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. 1995.

GLADEN 2001

Gladen, W.: *Kennzahlen- und Berichtssysteme: Grundlagen zum Performance Measurement*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 2001. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-86703-2>.

GLADEN 2014

Gladen, W.: *Performance Measurement: Controlling mit Kennzahlen*. 6., überarb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Wiesbaden: Springer Gabler. 2014.

GNATZ 2005

Gnatz, M. A. J.: *Vom Vorgehensmodell zum Projektplan*. Dissertation. München: Technische Universität München. 2005.

GÖPFERT 1998

Göpfert, J.: *Modulare Produktentwicklung: Zur gemeinsamen Gestaltung von Technik und Organisation*. Gabler Edition Wissenschaft, Markt- und Unternehmensentwicklung. Wiesbaden & s.l.: Deutscher Universitätsverlag. 1998. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-08152-4>.

GOTTMANN 2016

Gottmann, J., Hrsg. (2016): Produktionscontrolling. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2016.

GRUNWALD 2002

Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2001. Bd. Bd. 159. Forschungsberichte / IWB. München: Utz. 2002.

GUDEHUS 2011

Gudehus, T.: Logistik: Grundlagen - Strategien - Anwendungen. 4., aktualisierte Aufl 2010. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2011. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-89389-9>.

HAGEN 2003

Hagen, F. v. d.: Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2002. Bd. 172. Forschungsberichte / IWB. München: Utz. 2003.

HALL ET AL. 1994

Hall, R. I.; Aitchison, P. W.; Kocay, W. L.: Causal policy maps of managers: Formal methods for elicitation and analysis. System Dynamics Review 10 (1994) 4, S. 337–360.

HARS 1994

Hars, A.: Referenzdatenmodelle: Grundlagen effizienter Datenmodellierung. Schriften zur EDV-orientierten Betriebswirtschaft. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1994. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-90397-6>.

HAWER 2020

Hawer, S.: Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten. Dissertation. München: Technische Universität München. 2020.

HAWER ET AL. 2018

Hawer, S.; Schönmann, A.; Reinhart, G.: Guideline for the Classification and Modelling of Uncertainty and Fuzziness. Procedia CIRP 67 (2018) 2, S. 52–57.

HEGER 2007

Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten: Zugl.: Hannover,

Univ., Diss., 2006. Bd. 2007,1. Berichte aus dem IFA. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. 2007.

HEINEN 2011

Heinen, T.: Planung der soziotechnischen Wandlungsfähigkeit in Fabriken: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2011. Bd. 2011,4. Berichte aus dem IFA. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. 2011.

HERMANN ET AL. 2019

Hermann, L.; Rey, J.; Bergs, T.: Methodology for an Integrative Manufacturing Change Management in Technology Planning for Medical Products. International Conference on Competitive Manufacturing (COMA '19) (2019).

HERMANN ET AL. 2022

Hermann, L.; Schütz, M.; Coppers, F.; Barth, S.; Beckers, A.; Bergs, T.: Deterministic and cost-efficient change propagation analysis method for manufacturing process sequences. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 37 (2022) 6, S. 196–203.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2002. Als Ms. gedr. Bd. 149. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft. Düsseldorf: VDI-Verl. 2003.

X. L. HOANG ET AL. 2018

Hoang, X. L.; Fay, A.; Marks, P.; Weyrich, M.: Industrial Application of a MDM-Based Approach for Generation and Impact Analysis of Adaptation Options - a Case Study. In: 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE. 2018, S. 1244–1247.

X.-L. HOANG & FAY 2019

Hoang, X.-L.; Fay, A.: A Capability Model for the Adaptation of Manufacturing Systems. In: 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE. 2019, S. 1053–1060.

X.-L. HOANG ET AL. 2017a

Hoang, X.-L.; Fay, A.; Marks, P.; Weyrich, M.: Generation and impact analysis of adap-

tation options for automated manufacturing machines. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE. 2017, S. 1–8.

X.-L. HOANG ET AL. 2017b

Hoang, X.-L.; Marks, P.; Weyrich, M.; Fay, A.: Modeling of interdependencies between products, processes and resources to support the evolution of mechatronic systems. IFAC-PapersOnLine 50 (2017) 1, S. 4348–4353.

X.-L. HOANG ET AL. 2018

Hoang, X.-L.; Hildebrandt, C.; Fay, A.: Product-oriented description of manufacturing resource skills. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 90–95.

X.-L. HOANG ET AL. 2019

Hoang, X.-L.; Caesar, B.; Fay, A.: Adaptation of Manufacturing Machines by the Use of Multiple-Domain-Matrices and Variability Models. IFAC-PapersOnLine 52 (2019) 13, S. 1361–1366.

HOLLAUER 2019

Hollauer, C.: Workshop-based Tailoring of Interdisciplinary Product Development Processes by Means of Structural Analysis. München: Universitätsbibliothek der TU München. 2019.

HOMPEL 2018

Hompel, M. ten: Materialflusssysteme: Förder- und Lagertechnik. 4th ed. VDI-Buch Ser. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg. 2018. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5495477>.

HON & XU 2007

Hon, K.; Xu, S.: Impact of Product Life Cycle on Manufacturing Systems Reconfiguration. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 1, S. 455–458.

HORVÁTH 2012

Horváth, P.: Controlling. 12., vollständig überarbeitete Aufl. Vahlens Handbücher. München: Verlag Franz Vahlen. 2012. URL: <https://search.ebscohost>.

com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=678842.

HORVÁTH 2016

Horváth, P.: Führung mit Kennzahlen: If you can't measure it, you can't manage it. FuS – Zeitschrift für Familienunternehmen und Strategie (2016) 1, S. 3–8.

ISMAIL & H. ELMARAGHY 2009

Ismail, M. A.; ElMaraghy, H.: Progressive modeling—An enabler of dynamic changes in production planning. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58 (2009) 1, S. 407–412.

KALUS 2013

Kalus, G.: Projektspezifische Anpassung von Vorgehensmodellen. München, Technische Universität München, Diss., 2013. München: Universitätsbibliothek der TU München. 2013.

KARL 2015

Karl, F.: Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2014. Bd. 298. Forschungsberichte IWB / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München. München: Utz. 2015.

KARL & REINHART 2015

Karl, F.; Reinhart, G.: Reconfigurations on manufacturing resources: Identification of needs and planning. Production Engineering 9 (2015) 3, S. 393–404.

KATTNER 2020

Kattner, J. N.: Aufwandsorientierte Charakterisierung der Änderungsstruktur technischer Systeme. Dissertation. Garching: Technische Universität München. 2020.

KERNSCHMIDT & VOGEL-HEUSER 2013

Kernschmidt, K.; Vogel-Heuser, B.: An interdisciplinary SysML based modeling approach for analyzing change influences in production plants to support the engineering. In: 2013 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE. 2013, S. 1113–1118.

KERNSCHMIDT ET AL. 2014

Kernschmidt, K.; Behncke, F.; Chucholowski, N.; Wickel, M.; Bayrak, G.; Lindemann, U.; Vogel-Heuser, B.: An Integrated Approach to Analyze Change-situations in the Development of Production Systems. *Procedia CIRP* 17 (2014), S. 148–153.

KETT & SCHEWE 2010

Kett, I. W.; Schewe, G.: *Management Skills: Beziehungen nutzen, Probleme lösen, effektiv kommunizieren*. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler. 2010. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8349-8527-9>.

KIRCHHOF 2003

Kirchhof, R.: *Ganzheitliches Komplexitätsmanagement: Grundlagen und Methodik des Umgangs mit Komplexität im Unternehmen*. Gabler Edition Wissenschaft. Beiträge zur Produktionswirtschaft. Wiesbaden & s.l.: Deutscher Universitätsverlag. 2003. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-663-10129-1>.

KLEMKE 2014

Klemke, T.: *Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2013. Bd. 2014,1. Berichte aus dem IFA. Garbsen: PZH-Verl. 2014.*

KLOCKE ET AL. 2018

Klocke, F.; Müller, J.; Mattfeld, P.; Kukulies, J.; Schmitt, R. H.: Integrative Technology and Inspection Planning—A Case Study in Medical Industry. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 140 (2018) 5, S. 051002.

KOCH 2017

Koch, J.: *Manufacturing Change Management – a Process-Based Approach for the Management of Manufacturing Changes*. Dissertation. Munich: Technical University of Munich. 2017.

KOCH & HOFER 2016

Koch, J.; Hofer, A.: *Änderungsmanagement in der Produktion: Herausforderungen und Anwendungen in der industriellen Praxis*. *WT Werkstattstechnik* (2016), S. 520–526.

KOCH ET AL. 2016a

Koch, J.; Gritsch, A.; Reinhart, G.: *Process design for the management of changes in*

manufacturing: Toward a Manufacturing Change Management process. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 14 (2016), S. 10–19.

KOCH ET AL. 2016b

Koch, J.; Michels, N.; Reinhart, G.: Context Model Design for a Process-oriented Manufacturing Change Management. *Procedia CIRP* 41 (2016), S. 33–38.

KOLTUN ET AL. 2018

Koltun, G.; Neumann, E.-M.; Kattner, N.; Bauer, H.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Vogel-Heuser, B.: Cyclic Management of Innovative PSS Changes: An Integrated and Interdisciplinary Engineering View. In: 2018 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE). IEEE. 2018, S. 1–7.

KOSKO 1986

Kosko, B.: Fuzzy cognitive maps. *International Journal of Man-Machine Studies* 24 (1986) 1, S. 65–75.

KRAUSE & GEBHARDT 2018

Krause, D.; Gebhardt, N.: *Methodische Entwicklung Modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt Beherrschbar Entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Vieweg. 2018. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5215463>.

KREBS 2012

Krebs, P.: *Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten*. Bd. Band 255. *Forschungsberichte IWB*. München: Herbert Utz Verlag. 2012.

KRÖGER ET AL. 2019

Kröger, S.; Bauer, H.; Reinhart, G.: Kostenstruktur zur Bewertung von Änderungsauswirkungen in der Produktion. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 114 (2019) 9, S. 530–534.

KRUSE 1996

Kruse, C.: *Referenzmodellgestütztes Geschäftsprozeßmanagement*. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1996.

LANGLOIS 2002

Langlois, R. N.: Modularity in technology and organization. *Journal of Economic Behavior & Organization* 49 (2002) 1, S. 19–37.

LAUX ET AL. 2018

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: *Entscheidungstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2018.

LEE & HONG 2017

Lee, J.; Hong, Y. S.: Bayesian network approach to change propagation analysis. *Research in Engineering Design* 126 (2017) 5, S. 788.

LEHNERT 2015

Lehnert, S.: *Multiperspective Change Impact Analysis to Support Software Maintenance and Reengineering*. Dissertation. Hamburg: University of Hamburg. 2015.

LÉVÁRDY & BROWNING 2009

LÉVÁRDY, V.; Browning, T. R.: An Adaptive Process Model to Support Product Development Project Management. *IEEE Transactions on Engineering Management* 56 (2009) 4, S. 600–620.

LIENHART 2015

Lienhart, A.: *Seminare, Trainings und Workshops lebendig gestalten*. Haufe Taschen-Guide. Freiburg: Haufe-Lexware GmbH & Co. KG. 2015.

LINDEMANN & REICHWALD 1998

Lindemann, U.; Reichwald, R.: *Integriertes Änderungsmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 1998.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: *Structural Complexity Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009.

LIPP & WILL 2008

Lipp, U.; Will, H.: *Das große Workshop-Buch: Konzeption, Inszenierung und Moderation von Klausuren, Besprechungen und Seminaren*. 8., überarbeitete und erweiterte Auflage. Reihe Beltz Weiterbildung. Weinheim & Basel: Beltz Verlag. 2008. URL:

http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=3049802&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm.

LÜBKEMANN 2016

Lübkemann, J.: Ermittlung des Restrukturierungsbedarfs von Fabriken. Dissertation. Leibniz Universität Hannover & TEWISS - Technik und Wissen GmbH. 2016.

LÜBKEMANN & NYHUIS 2016

Lübkemann, J.; Nyhuis, P.: Modellbasierte Restrukturierung von Fabriken. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 111 (2016) 1-2, S. 7–10.

MALAK & AURICH 2013

Malak, R. C.; Aurich, J. C.: Software Tool for Planning and Analyzing Engineering Changes in Manufacturing Systems. Procedia CIRP 12 (2013), S. 348–353.

MALAK 2013

Malak, R. C.: Methode zur softwarebasierten Planung technischer Änderungen in der Produktion: Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2013. Als Ms. gedr. Bd. 2013,5. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. Kaiserslautern: Lehrstuhl für Fertigungstechnik und Betriebsorganisation Techn. Univ. 2013.

MALCOLM ET AL. 1959

Malcolm, D. G.; Roseboom, J. H.; Clark, C. E.; Fazar, W.: Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation. Operations Research 7 (1959) 5, S. 646–669.

MARKS ET AL. 2017

Marks, P.; Weyrich, M.; Hoang, X. L.; Fay, A.: Agent-based adaptation of automated manufacturing machines. In: 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). IEEE. 2017, S. 1–8.

MARKS ET AL. 2018

Marks, P.; Hoang, X. L.; Weyrich, M.; Fay, A.: A systematic approach for supporting the adaptation process of discrete manufacturing machines. Research in Engineering Design 29 (2018) 4, S. 621–641.

MARTÍNEZ-RUIZ ET AL. 2012

Martínez-Ruiz, T.; Münch, J.; García, F.; Piattini, M.: Requirements and constructors

for tailoring software processes: a systematic literature review. *Software Quality Journal* 20 (2012) 1, S. 229–260.

MEISSNER & BLESSING 2006

Meißner, M.; Blessing, L.: Defining an adaptive product development methodology. 9th International Design Conference, DESIGN 2006 (2006), S. 69–78.

MEUDT 2020

Meudt, T.: Wertstromanalyse 4.0 - Eine Methode zur integrierten Erfassung und Analyse von Material- und Informationsflüssen in Wertströmen. 1. Auflage. Schriftenreihe des PTW - Innovation Fertigungstechnik. Düren: Shaker. 2020.

MEUDT ET AL. 2016

Meudt, T.; Rößler, M. P.; Böllhoff, J.; Metternich, J.: Wertstromanalyse 4.0. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 111 (2016) 6, S. 319–323.

MEYER ET AL. 2007

Meyer, C. M.; Kersten, W.; Nedeß, C.: Integration des Komplexitätsmanagements in den strategischen Führungsprozess der Logistik: Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Institut für Logistik und Unternehmensführung, Diss., 2006 u.d.T.: Meyer, Christian Martin: Komplexitätsmanagement in der Logistik. 1. Aufl. Bd. 12. Schriftenreihe Logistik der Kühne-Stiftung. Bern: Haupt. 2007.

MIESE 1976

Miese, M.: Systematische Montageplanung in Unternehmen mit Kleinserienproduktion. 1. Aufl. Schwerpunkt industrielle Produktion. Essen: Girardet. 1976.

MILBERG & SCHUH 2002

Milberg, J.; Schuh, G., Hrsg. (2002): Erfolg in Netzwerken. Springer eBook Collection Business and Economics. Berlin, Heidelberg & s.l.: Springer Berlin Heidelberg. 2002.

MÖHRLE 2018

Möhrle, M.: Gestaltung von Fabrikstrukturen für die additive Fertigung. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2018.

MÖLLER 2008

Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme:

Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2008. Bd. 212. Forschungsberichte IWB. München: Utz. 2008.

MORRIS ET AL. 2014

Morris, D. E.; Oakley, J. E.; Crowe, J. A.: A web-based tool for eliciting probability distributions from experts. *Environmental Modelling & Software* 52 (2014), S. 1–4.

MURR 1999

Murr, O., Hrsg. (1999): Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1999. Bd. Bd. 130. Forschungsberichte / IWB. München: Utz. 1999.

NAKAJIMA 1990

Nakajima, S.: Introduction to TPM - Total Productive Maintenance. 5.print. Cambridge, Mass. [u.a.]: Productivity Pr. 1990.

NEUHAUSEN 2002

Neuhausen, J.: Methodik zur Gestaltung modularer Produktionssysteme für Unternehmen der Serienproduktion. Dissertation. Aachen: RWTH Aachen University. 2002.

NOFEN 2006

Nofen, D.: Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik: Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2006. Bd. 2006,1. Berichte aus dem IFA. Garbsen: PZH Produktionstechn. Zentrum. 2006.

NYHUIS 2008

Nyhuis, P., Hrsg. (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten. Hannover & Garbsen: Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek & PZH Produktionstechnisches Zentrum. 2008. URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb10/633626406.pdf>.

OBERHOLZER ET AL. 2015

Oberholzer, G.; Eichholzer, A.; Ruberti, S.: Workshop Baukasten: Bauplan und Werkzeuge für herausragende Workshops. 2. Aufl. Bd. 1. Stimmt Booklets. Berlin: epubli GmbH. 2015.

PASQUAL & WECK 2012

Pasqual, M. C.; Weck, O. L. de: Multilayer network model for analysis and management of change propagation. *Research in Engineering Design* 23 (2012) 4, S. 305–328.

PAWELLEK 2014

Pawellek, G.: *Ganzheitliche Fabrikplanung: Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung*. 2. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer Vieweg. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43728-5>.

PEDREIRA ET AL. 2007

Pedreira, O.; Piattini, M.; Luaces, M. R.; Brisaboa, N. R.: A systematic review of software process tailoring. *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes* 32 (2007) 3, S. 1–6.

PERRY & HOLT 2006

Perry, S.; Holt, J.: SysML: describing the system. *Information Professional* 3 (2006) 4, S. 35–37.

PLEHN ET AL. 2015a

Plehn, C.; Koch, J.; Diepold, K.; Stahl, B.; Lohman, B.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Modeling and Analyzing Dynamic Cycle Networks for Manufacturing Planning. *Procedia CIRP* 28 (2015), S. 149–154.

PLEHN ET AL. 2015b

Plehn, C.; Stein, F.; Reinhart, G.: Modeling Factory Systems Using Graphs: A Contribution toward the Analysis of Strategic System Properties. In: *ICED 2015 - Design for Life*. Hrsg. von G. Cascini; M. Cantamessa. 2015.

PLEHN 2017

Plehn, C.: *A method for analyzing the impact of changes and their propagation in manufacturing systems*. Dissertation. Herbert Utz Verlag GmbH. 2017.

PLEHN ET AL. 2016

Plehn, C.; Stein, F.; Neufville, R. de; Reinhart, G.: Assessing the Impact of Changes and their Knock-on Effects in Manufacturing Systems. *Procedia CIRP* 57 (2016), S. 479–486.

POHL 2014

Pohl, J.: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen: Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2013. Bd. 284. Forschungsberichte IWB. München: Utz. 2014.

PREISSLER 2008

Preißler, P. R.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen: Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. De Gruyter Oldenbourg. 2008.

PROSTEP iViP E.V. 2014

ProSTEP iViP e.V.: Manufacturing Change Management (White Paper): Management von Änderungen in der Produktion (Management of changes in production). Darmstadt: ProSTEP iViP e.V. 2014.

PROSTEP iViP E.V. 2015

ProSTEP iViP e.V.: Manufacturing Change Management. Management of Changes during Production. Darmstadt: ProSTEP iViP e.V. 2015.

PRÜLLER 2018

Prüller, H.: Praxiswissen Gleitschleifen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. 2018.

REINHART & GRUNWALD 2001

Reinhart, G.; Grunwald, S.: Changeability through flexible and integrated product design and assembly planning. In: Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP2001). Assembly and Disassembly in the Twenty-first Century. (Cat. No.01TH8560). IEEE. 2001, S. 318–323.

REINHART 2017

Reinhart, G., Hrsg. (2017): Handbuch Industrie 4.0: Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Carl Hanser Verlag & Ciando. 2017.

REINHART ET AL. 2009a

Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Rimpau, C.: Cycle-Oriented Production Structure Monitoring. In: 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). Hrsg. von M. F. Zaeh; H. A. ElMaraghy. München: Utz. 2009, S. 693–701.

REINHART ET AL. 2009b

Reinhart, G.; Pohl, J.; Schindler, S.; Karl, F.; Rimpau, C.: Zyklenorientiertes Produktionsstruktur-Monitoring. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 9, S. 750–754.

REY ET AL. 2019

Rey, J.; Apelt, S.; Trauth, D.; Mattfeld, P.; Bergs, T.; Klocke, F.: Highly iterative technology planning: processing of information uncertainties in the planning of manufacturing technologies. Production Engineering 13 (2019) 3-4, S. 361–371.

RICHTER ET AL. 2014

Richter, L.; Lübke, J.; Nyhuis, P.: Development of a Model for the Redesign of Plant Structures. International Journal of Social, Education, Economics and Management Engineering (2014) 8, S. 3295–3298.

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie : eine Systemtheorie der Technik. s.l.: KIT Scientific Publishing. 2009. URL: <http://www.doabooks.org/doab?func=fulltext&rid=15084>.

RÖSSING 2007

Rößing, M.: Technische Änderungen in der Produktion - Vorgehensweise zur systematischen Initialisierung, Durchführung und Nachbereitung: Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2007. Als Ms. gedr. Bd. 2007,2. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. Kaiserslautern: Techn. Univ. 2007.

ROTHER & SHOOK 2009

Rother, M.; Shook, J.: Learning to see: Value-stream mapping to create value and eliminate muda. Version 1.4. A lean tool kit method and workbook. Cambridge, Mass.: Lean Enterprise Inst. 2009.

RUBINSTEIN & KROESE 2017

Rubinstein, R. Y.; Kroese, D. P.: Simulation and the Monte Carlo method. Third edition. Wiley series in probability and statistics. Hoboken, New Jersey: Wiley. 2017.

SAATY 1988

Saaty, T. L.: Multicriteria decision making: The analytic hierarchy process ; planning,

priority setting, resource allocation. 2. ed., with new material added. Bd. 1. The analytic hierarchy process series. New York: McGraw-Hill. 1988.

SCHADY 2008

Schady, R.: Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung. Dissertation. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2008.

SCHENK ET AL. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2014.

SCHILLING 2000

Schilling, M. A.: Toward a General Modular Systems Theory and Its Application to Interfirm Product Modularity. *The Academy of Management Review* 25 (2000) 2, S. 312.

SCHMIGALLA 1995

Schmigalla, H.: Fabrikplanung: Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation. München: Hanser. 1995.

SCHÖNLMANN 2019

Schönmann, A. F.: Antizipative Identifikation produktionstechnologischer Substitutionsbedarfe durch Verwendung von Zyklusmodellen. Bd. 345. Forschungsberichte IWB. München: utzverlag GmbH. 2019.

SCHUH ET AL. 2021

Schuh, G.; Guetzlaff, A.; Sauer mann, F.; Krug, M.: Data-based improvement of engineering change impact analyses in manufacturing. *Procedia CIRP* 99 (2021), S. 580–585.

SCHUH 1999

Schuh, G., Hrsg. (1999): Change-Management: Von der Strategie zur Umsetzung. [2. Aufl.], als Ms. gedr. Berichte aus der Betriebswirtschaft. Aachen: Shaker. 1999.

SCHUH 2014

Schuh, G.: Produktionsmanagement: Handbuch Produktion und Management 5. 2. Aufl. Bd. 5. Handbuch Produktion und Management. Berlin: Springer Vieweg. 2014.

SCHÜTTE 1998

Schütte, R.: Grundsätze ordnungsmäßiger Referenzmodellierung. Wiesbaden: Gabler Verlag. 1998.

SCHWEGMANN 1999

Schwegmann, A.: Objektorientierte Referenzmodellierung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag. 1999.

SIPPL & REINHART 2021

Sipl, F.; Reinhart, G.: A Framework for Data-Based Change Impact Analysis in Manufacturing. *Procedia CIRP* 104 (2021) 2, S. 247–252.

SIPPL ET AL. 2021

Sipl, F.; Schellhaas, L.; Bauer, H.: Umfrage zum Änderungsmanagement in der Produktion Status quo, industrielle Anwendung der Änderungsauswirkungsanalyse und Stand der Digitalisierung. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 116 (2021) 4, S. 208–212.

SIPPL ET AL. 2022a

Sipl, F.; Moriz, T.; Reinhart, G.: A process mining-based approach for stakeholder identification in manufacturing and engineering change management. *Procedia CIRP* 107 (2022), S. 978–983.

SIPPL ET AL. 2022b

Sipl, F.; del Rio, B.; Reinhart, G.: Approach for stakeholder identification in Manufacturing Change Management. *Procedia CIRP* 106 (2022), S. 191–196.

SIPPL ET AL. 2022c

Sipl, F.; Magg, R.; Gil, C. P.; Düring, S.; Reinhart, G.: Data-Based Stakeholder Identification in Technical Change Management. *Applied Sciences* 12 (2022) 16, S. 8205.

STACHOWIAK 1973

Stachowiak, H.: Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer. 1973.

STANEV 2012

Stanev, S.: Methodik zur produktionsorientierten Produktanalyse für die Wiederverwendung von Produktionssystemen - 2REUSE. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut

für Technologie. 2012. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0072-306748>.

STANEV ET AL. 2008

Stanev, S.; Krappe, H.; Ola, H. A.; Georgoulis, K.; Papakostas, N.; Chryssolouris, G.; Ovtcharova, J.: Efficient change management for the flexible production of the future. *Journal of Manufacturing Technology Management* 19 (2008) 6, S. 712–726.

STEINBAUER 2012

Steinbauer, C. M. T.: Modell zur Konfiguration der Kleinserienmontage: Eine theoretische und empirische Analyse. Dissertation. München: Technische Universität München. 2012.

TOLIO ET AL. 2010

Tolio, T.; Ceglarek, D.; ElMaraghy, H. A.; Fischer, A.; Hu, S. J.; Laperrière, L.; Newman, S. T.; Váncza, J.: SPECIES—Co-evolution of products, processes and production systems. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 2, S. 672–693.

ULRICH 2001

Ulrich, H., Hrsg. (2001): Die Unternehmung als produktives soziales System: Grundlagen der allgemeinen Unternehmungslehre. Bern: Haupt. 2001.

VDI 3633 2018

VDI 3633: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe. Berlin: Beuth Verlag GmbH. 2018.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2014

Vogel-Heuser, B.; Lindemann, U.; Reinhart, G., Hrsg. (2014): Innovationsprozesse zyklensorientiert managen: Verzahnte Entwicklung von Produkt-Service Systemen. Berlin: Springer Vieweg. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44932-5>.

WEBER & SCHÄFFER 2020

Weber, J.; Schäffer, U.: Einführung in das Controlling. 16., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag. 2020. URL: <https://doi.org/10.34156/9783791043340>.

WESTKÄMPER 2009

Westkämper, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Springer eBook Collection Business and Economics. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. 2009. URL: <http://swbplus.bsz-bw.de/bsz32700844Xcov.htm>.

M. WICKEL 2017

Wickel, M.: Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen. Dissertation. Garching: Technische Universität München. 2017.

M. C. WICKEL & LINDEMANN 2015

Wickel, M. C.; Lindemann, U.: How to build up an Engineering Change dependency model based on past change data? In: Modeling and managing complex systems. Hrsg. von T. R. Browning; S. D. Eppinger; D. M. Schmidt; U. Lindemann. München: Hanser. 2015, S. 221–231.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H. A.; Nyhuis, P.; Zäh, M. F.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 783–809.

WIENDAHL ET AL. 2005

Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F.: Planung modularer Fabriken. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. 2005.

WIENDAHL ET AL. 2014

Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2., überarb. und erw. Aufl., [elektronische Ressource]. München: Hanser. 2014. URL: <http://dx.doi.org/10.3139/9783446437029>.

WILDEMANN 2014

Wildemann, H.: Komplexitätsmanagement: In Vertrieb, Beschaffung, Produkt, Entwicklung und Produktion. 15. Aufl. Bd. 49. Leitfaden / TCW Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management. München: TCW Transfer-Centrum Verl. 2014.

WIRTH ET AL. 2012

Wirth, S.; Schenk, M.; Müller, E.: Wandlungsfähige und ressourceneffiziente Fabriken. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 6, S. 391–397.

WONSAK ET AL. 2021

Wonsak, I.; Bauer, H.; Sippl, F.; Reinhart, G.: A scenario-based approach for translating strategic perspectives into input variables for production planning and control. Procedia CIRP 104 (2021), S. 429–434.

WULF 2011

Wulf, S.: Bewertung des Einflusses von Produkt- und Technologieveränderungen auf die Fabrik. Bd. 02/2011. Berichte aus dem IFA / Institut für Fabrikanlagen und Logistik. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum. 2011.

YOON ET AL. 2001

Yoon, I.-C.; Min, S.-Y.; Bae, D.-H.: Tailoring and verifying software process. In: Proceedings Eighth Asia-Pacific Software Engineering Conference. IEEE Comput. Soc. 2001, S. 202–209.

ZÄH ET AL. 2005a

Zäh, M. F.; Müller, N.; Rimpau, C.: A holistic framework for enhancing the changeability of production systems. In: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Hrsg. von M. Zäh; G. Reinhart. München: Utz. 2005, S. 77–84.

ZÄH ET AL. 2005b

Zäh, M. F.; Möller, N.; Vogl, W.: Symbiosis of Changeable and Virtual Production: The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success? In: 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). Hrsg. von M. Zäh; G. Reinhart. München: Utz. 2005, S. 3–10.

Anhang

A.1 Flussverbindungen in einem Produktionssystem

Die Produktion wird durch acht Vernetzungsarten, sog. Flüsse, geprägt (WIENDAHL ET AL. 2005, 24 f.):

- **Materialflüsse** beschreiben die räumlichen und zeitlichen Veränderungen des Materials in einer Fabrik, wobei die Bewegungen zwischen Fabrikobjekten und nicht innerhalb eines Fabrikobjekts verstanden werden. Als Materialien werden alle Roh-, Hilfs-, Betriebsstoffe, Halbfertig- und Fertigwaren verstanden.
- **Energieflüsse** ermöglichen eine räumliche und zeitliche Ver- und Entsorgung der Betriebsmittel und Gebäudetechnik. Dies geschieht abhängig von der benötigten Energieart (Strom, Gas, Öl) und dem erforderlichen Energiebedarf.
- **Medienflüsse** bzw. **Stoffflüsse** ermöglichen eine räumliche und zeitliche Ver- und Entsorgung der Betriebsmittel und Gebäudetechnik. Dies geschieht im Hinblick auf die Medienart (Wasser, Druckluft, Kühlschmierstoff) und den Medienbedarf.
- **Informationsflüsse** beschreiben die objektinterne sowie -übergreifende Kommunikation mittels technischer Hilfsmittel. Technische Hilfsmittel sind z. B. Hauspost, Telefon, Fax, E-Mail oder Speichermedien. Abgesehen von der telefonischen Informationsübertragung werden grundlegend nonverbale und dokumentierte Daten übermittelt.
- **Kommunikationsflüsse** charakterisieren die verbale und visuelle Kommunikation zwischen Personen, welche weder formal noch an technische Medien gebunden sind.

- **Personalflüsse** beschreiben zum einen alle Bewegungen von Personen innerhalb einer Fabrik und zum anderen alle Bewegungen in eine Fabrik hinein sowie aus ihr hinaus. Diese Bewegungen können in einem Fabrikobjekt oder zwischen verschiedenen Fabrikobjekten stattfinden.
- **Werteflüsse** werden durch den Übergang von Verrechnungseinheiten eines organisatorischen Objektes oder Systems auf andere Objekte/Systeme innerhalb der Organisation definiert. Dies wird zudem durch den Übergang monetärer Forderungen auf bspw. Eigentümer, Mitarbeiter, Fremdkapitalgeber, Lieferanten, Management, Kunden, Wettbewerber, staatliche und gesellschaftliche Organe der Organisation ergänzt.
- **Kraftflüsse** beschreiben den Weg von Kräften und/oder Momenten innerhalb eines Fabrikobjektes/Fabriksystems, ausgehend vom Kraftangriffspunkt bis zu der Stelle, wo die Reaktionskraft oder das Reaktionsmoment von der Umgebung (z. B. Fundament) aufgenommen wird (HEISEL ET AL. 1994).

A.2 Analyse von Änderungsauswirkungen im Engineering Change Management

Das Framework von BRAHMA & WYNN (2023) ordnet die Konzepte der Analyse von Änderungsauswirkungen im ECM in Kategorien bezüglich „Kontext und Theorie“ sowie „Methoden und Modellen“ ein (siehe Abbildung A.1). Die detaillierte Auflistung aller Konzepte und deren Kategorisierung steht unter folgendem Link zur Verfügung: <https://doi.org/10.1007/s00163-022-00395-y>.

A.2 Analyse von Änderungsauswirkungen im Engineering Change Management

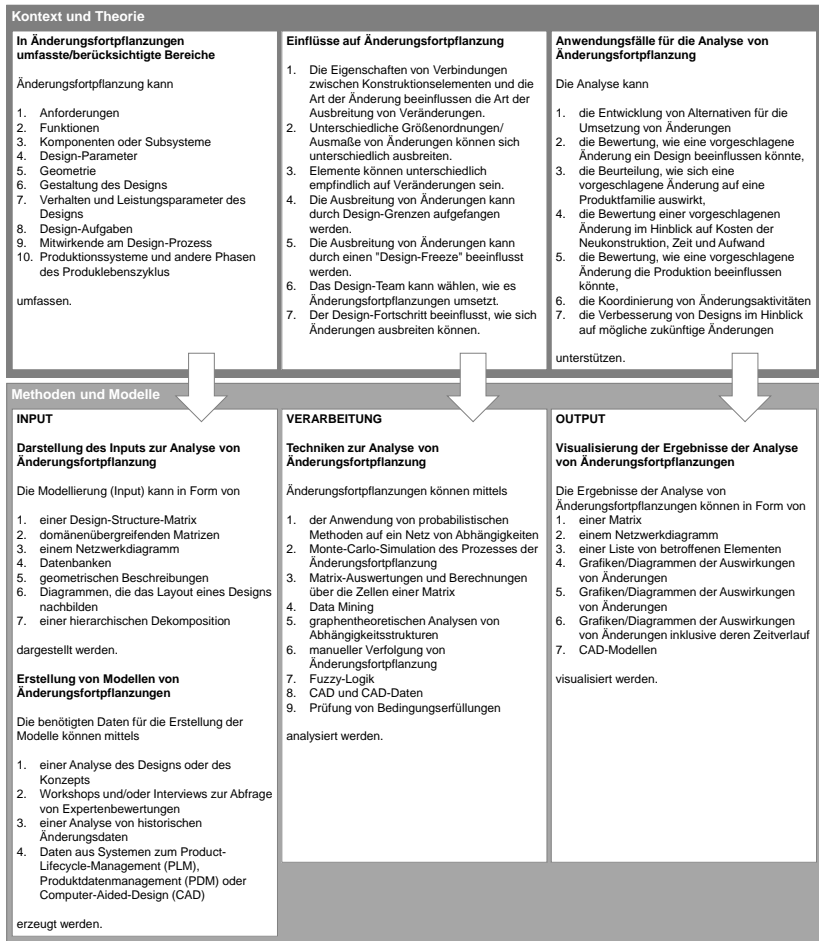


Abbildung A.1: Kategorisierung von Konzepten zur Analyse von Änderungsauswirkungen im ECM (BRAHMA & WYNN 2023)

Die verschiedenen Anwendungsfälle der Konzepte ordnen BRAHMA & WYNN (2023) in den ECM-Prozess von JARRATT (2004) ein (siehe Abbildung A.2).

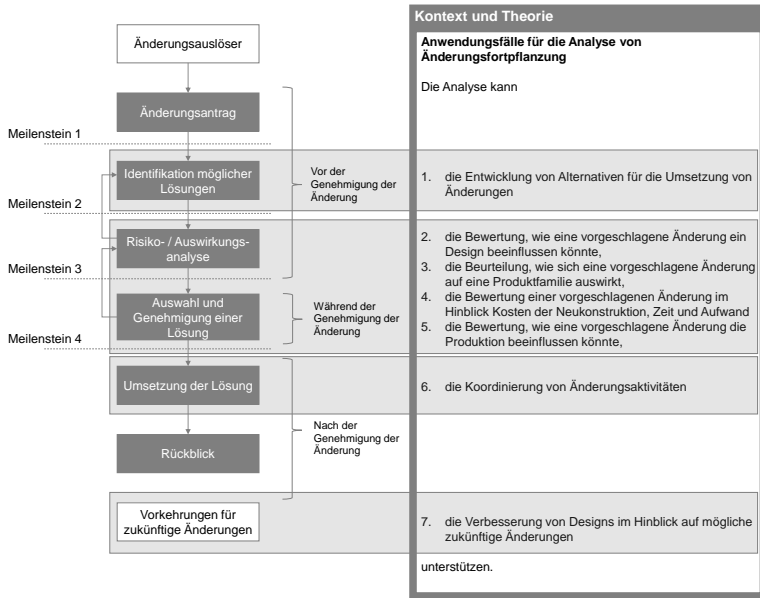


Abbildung A.2: Anwendungsfälle für die Analyse von Änderungsauswirkungen im ECM und deren Einordnung in den ECM-Prozess (BRAHMA & WYNN 2023)

A.3 Recherche zu Zielsetzungen der Änderungsauswirkungsanalyse

Tabelle A.1: Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Quelle	Zielsetzung	Genauigkeit
KOCH (2017)	Beeinflusste Elemente und Stakeholder	-
	Änderungsbedarfe	-
	Änderungsförtpflanzungen	-
	Investitionskosten	-
	Nutzen der Änderung	-
PROSTEP 1VIP E. V. (2014, 2015)	Betroffene Elemente	-
	Bearbeitungszeitraum	-

Tabelle A.2: Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Quelle	Zielsetzung	Genauigkeit
RÖSSING (2007)	Betroffene Produktionsobjekte Notwendige Umsetzungsschritte Abschätzung der Änderungskosten Abschätzung des Zeitaufwands	Potenziell betroffene Produktionsobjekte inkl. Auswirkungsintensität expertenbasierte, sichere Angabe Expertenschätzung (eindeutiger Wert) Expertenschätzung (eindeutiger Wert)
MALAK & AURICH (2013) & MALAK (2013)	Layoutverträglichkeit Vernetzungen und Vollständigkeit Konfliktbeziehung Auswirkungen auf die Prozesskette (Produktionskennzahlen)	Angabe von problematischen Gebäudeanforderungen Angabe von fehlenden Flussverbindungen und Prozessschritten Angabe von problematischen Beziehungen zwischen den Betriebsmitteln Berechnung von voraussichtlichen Durchlaufzeiten, Stückkosten und Kapazitätsauslastungen
KERNSCHMIDT ET AL. (2014)	Kompatibilität der Vernetzungen Auswirkungen auf die Lebenszyklusphasen	Bestimmung von Kompatibilitätsproblemen expertenbasierte Schätzung
BERGS ET AL. (2020) & HERMANN ET AL. (2020)	Beeinflusste Produktionsschritte Stückkosten	Potenzielle Auswirkung und Prüfung durch Expert*in, ggf. Bewertung unter Unsicherheiten Berechnung von Produktionskosten, Materialkosten und Prüfkosten im geänderten System
CISEK (2005)	Änderungsbedarfe	Hinweise auf Änderungsbedarfe durch Überwachung von Kennzahlentrends

Tabelle A.3: Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Quelle	Zielsetzung	Genauigkeit
POHL (2014)	<p>Änderungsbedarfe</p> <p>Realisierbarkeit von Änderungen</p> <p>Adaptionskosten und Herstellkosten</p>	<p>Hinweise auf Änderungsbedarfe durch Überwachung von Kennzahlengrenzwerten</p> <p>Potenziell betroffene Elemente der Bereiche Produkt, Technologie und Betriebsmitteln</p> <p>Wahrscheinlichkeitsverteilung</p>
KARL (2015)	<p>Änderungsbedarfe</p> <p>Folgeänderungen</p> <p>Rekonfigurationskosten</p>	<p>Bestimmung von Änderungsbedarfen durch Überwachung von Betriebsmitelanforderungen</p> <p>Potenziell betroffene Elemente</p> <p>Wahrscheinlichkeitsverteilung</p>
PLEHN (2017)	<p>Betroffene Elemente</p> <p>Zeitaufwand für Planung und Implementierung</p> <p>Änderungskosten</p>	<p>Potenziell betroffene Elemente unter Unsicherheit</p> <p>Wahrscheinlichkeitsverteilung</p> <p>Wahrscheinlichkeitsverteilung</p>
NOFEN (2006)	<p>Anpassungsbedarfe</p> <p>Direkt betroffene Fabrikelemente</p>	<p>Hinweis auf Anpassungsbedarfe durch die Überwachung von Wandlungsbedarfsindikatoren</p> <p>Potenziell betroffene Elemente</p>
WULF (2011)	<p>Anpassungsbedarfe</p> <p>Notwendige Maßnahmen</p> <p>Kosten und Implementierungszeit</p>	<p>Notwendige Bedarfe durch Anforderungsabgleich</p> <p>expertenbasiert</p> <p>expertenbasierte Schätzung</p>

Tabelle A.4: Übersicht der Ergebnisse der Literaturrecherche zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Quelle	Zielsetzung	Genauigkeit
LÜBKEMANN (2016) & RICHTER ET AL. (2014)	Änderungsbedarfe	Hinweise auf durch einen Änderungstreiber potenziell betroffene Fabrikelemente
HOANG ET AL. (2019)	Direkt betroffene Elemente	Potenziell und sicher betroffene Elemente
SIPPL ET AL. (2022a,b), etc.	Stakeholder	Potenziell betroffene Stakeholder mit Ähnlichkeitswert des CRP oder Häufigkeit der Einbindung in vergangenen Änderungsprozessen

Tabelle A.5: Übersicht Ergebnisse der industriellen Fallstudien zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Einsatzbereich der Fallstudie	Zielsetzung	Genauigkeit
Prozessplanung/ Netzwerkplanung	Rekonfigurationsmaßnahmen für Integration neuer Produktvarianten Rekonfigurationskosten für die Integration neuer Produktvarianten	expertenbasierte, sichere Angabe geschätzter Wertebereich
Prozessplanung	Änderungsbedarfe durch Produktänderung	sichere Bestimmung
Serienbetreuung	Auswirkung von Produktänderungen auf - Austaktung - Layout/Platzbedarf - Ergonomie Änderungsbedarfe	qualitative Bewertung mit Gewichtung qualitative Bewertung mit Gewichtung qualitative Bewertung mit Gewichtung Hinweis auf potenzielle Änderungsbedarfe inkl. der Änderungsursache

Tabelle A.6: Übersicht Ergebnisse der industriellen Fallstudien zu Zielsetzungen und Genauigkeit der Änderungsauswirkungsanalyse im Kontext der Produktion

Einsatzbereich der Fallstudie	Zielsetzung	Genauigkeit
Strukturplanung	Auswirkung einer Produktionstechnologie auf - Layout/Platzbedarf - Investitions- und laufende Kosten/Einsparungen Änderungsmaßnahmen Änderungsdauer	Liste der Layoutanpassungen Schätzwert (ein Wert) Liste der sicher durchzuführenden Änderungsmaßnahmen Geschätzte Umsetzungsdauer pro Änderungsmaßnahme (ein Wert)
Qualitätsmanagement (Lieferantenqualität)	Auswirkungen von Produktänderungen auf die Produktqualität	Stärke der Auswirkung einer Änderung auf bestimmte Qualitätskriterien, Gewichtungen gering (1), mittel (2) und stark (3)
Logistikplanung	Auswirkung von Wertstromänderungen auf die Logistikkennzahlen - Investitionskosten - laufende Fixkosten - Transportwege und Transportvolumen - Anzahl an (automatisierten) Handlungsschritten	quantitative Berechnung (eindeutiger Wert) quantitative Berechnung (eindeutiger Wert) quantitative Berechnung (eindeutiger Wert) quantitative Berechnung (eindeutiger Wert)

Tabelle A.7: Übersicht Ergebnisse der Experteninterviews zu erfassten Änderungskosten und Bewertungsgrößen für Änderungen

Unternehmensbereich	Bewertungsgrößen für Änderungen
Instandhaltungsplanung	Investitionskosten Gemeinkosten Personaleinsparung Veränderung Taktzeit Qualitätskosten Produktivität Anlagenverfügbarkeit

Tabelle A.8: Übersicht Ergebnisse der Experteninterviews zu erfassten Änderungskosten und Bewertungsgrößen für Änderungen

Unternehmensbereich	Bewertungsgrößen für Änderungen
Produktionsplanung und -steuerung Montage	Produktivität Zykluszeit Gesamtanlageneffektivität Arbeitssicherheit Qualität Senkung Produktionskosten
Operational Excellence	Kosten: Werkzeugkosten, Nacharbeitskosten, Personalaufwand, Versuchskosten Nutzen: Produktivitätssteigerung, Einsparungen (Material etc.)
Prozessoptimierung	Kosten: Werkzeugkosten, Nacharbeitskosten, Auswirkungen auf Zulieferteile Qualität Zeit Gesamtanlageneffektivität
Produktionssystem- und Fabrikplanung	Kosten Qualität Zeit Produktivität

A.4 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2016 bis 2020 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors zahlreiche studentische Arbeiten. Diejenigen, deren Ergebnisse zur vorliegenden Dissertation beigetragen haben oder eine wesentliche Inspiration waren, sind in Tabelle A.9 dargestellt. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Tabelle A.9: Studienarbeiten, die zur vorliegenden Arbeit beigetragen haben

Studierende	Titel der Studienarbeit	Beigetragen zu
Alcalá-Santaella, L.	Reference model for production systems	Kapitel 5
Batut, M.	Auswirkungsanalyse von produktinduzierten Produktionsänderungen auf Austaktung, Layout und Ergonomie einer bestehenden Montagelinie	Kapitel 5
Braun, H.	Development of a methodology to assess and compare alternative value streams	Kapitel 5
Glonner, P.	Identifikation und Bewertung von Rekonfigurationspfaden in der Hochvoltsspeicher-Montage	Kapitel 5
Haase, P.	Analyse von Änderungsfortpflanzungen in der Fabrik	Kapitel 2 & 5
Haase, P.	Management und Auswirkungsanalyse von Produktänderungen in der additiven Fertigung	Kapitel 5, 6 & 7
Hallweger, L.	Methode zur Erstellung eines Kennzahlensystems für die Produktion	Kapitel 5
Hallweger, L.	Auswirkungsanalyse von Bauteiländerungen auf die Produktqualität	Kapitel 5
Hanci, D.	Change Causes in Manufacturing	Kapitel 2 & 5
Kiersch, N.	Entwicklung eines Methodenbaukastens für die systematische Auswirkungsanalyse von Änderungen in der Produktion	Kapitel 2, 5 & 6
Kröger, S.	Kostenstruktur zur Bewertung der Auswirkungen von Änderungen in der Produktion	Kapitel 5
Lütkes, F.	Entwicklung eines modularen Methodenbaukastens für die Erstellung von individuellen Änderungsauswirkungsanalysen	Kapitel 5 & 6
Maier, M.	Kennzahlenbasierte Auslegung von Produktionssystemen	Kapitel 5
Möller, P.	Änderungsauswirkungsanalysen in Änderungsmanagement-Prozessen – Anforderungen und Einsatzmöglichkeiten	Kapitel 5
Möller, P.	Generation of performance measurement systems in manufacturing	Kapitel 5
Neubert, J.	Workshopkonzept für die ganzheitliche Analyse von Änderungsauswirkungen in der Produktion	Kapitel 5, 6 & 7