TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten

Sven Hawer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr. Wolfram Volk
Prüfer der Dissertation:	1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
	2. Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis

Die Dissertation wurde am 26.07.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 13.01.2020 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 Potenziale 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*

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh, den Leitern dieses Instituts, für ihre stets großzügige Unterstützung und Förderung.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart bedanke ich mich darüber hinaus für die wohlwollende und konstruktive Betreuung meiner Arbeit sowie bei Herrn Prof. Dr. Wolfram Volk für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Nyhuis, dem Leiter des Instituts für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover, für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht meiner Dissertation.

Susanne Vernim, Felix Brandl und Alexander Schönmann danke ich für die wertvollen Hinweise und die gründliche Korrektur dieser Arbeit.

Des Weiteren gilt mein Dank allen Kollegen am *iwb*, die meine Zeit am Institut zu einem unvergesslichen Erlebnis mit vielen positiven Momenten und Erfahrungen gemacht haben. Den Titel des „Ehrenfügers“ trage ich mit Stolz.

Meinen Eltern danke ich dafür, dass Sie mich in meiner Ausbildung stets unterstützt und mir die Möglichkeit gegeben haben, meine eigenen Ziele zu verfolgen und zu erreichen. Auch meinen Schwiegereltern möchte ich für die Unterstützung während meiner Promotion und darüber hinaus danken.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Jeanette danken, die mir stets den Rücken freigehalten und mich zu diesem Promotionsvorhaben ermutigt hat.

München, Juli 2019 Sven Hawer

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis ..... **V**

Verzeichnis der Formelzeichen ..... **VII**

1 Einleitung **1**

1.1 Motivation 1

1.2 Zielsetzung der Arbeit 2

1.3 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs 4

1.4 Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen 7

2 Grundlagen **11**

2.1 Begriffsdefinitionen 11

2.1.1 Fabrik, Fabrikstruktur und Fabrikplanung 11

2.1.2 Daten, Information und Wissen 12

2.1.3 Veränderungsfähigkeit und Veränderungsbefähiger 12

2.1.4 Unschärfe, Unsicherheit und verwandte Begriffe 15

2.2 Modellierung und Klassifizierung von Unsicherheit und Unschärfe 17

2.2.1 Klassifizierungsansätze für Unsicherheit und Unschärfe 17

2.2.2 Relevante Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik 20

2.2.3 Grundlagen der Fuzzy-Set-Theorie 22

2.3 Unschärfefortpflanzung in Systemen 24

2.3.1 Analytisches Verfahren 25

2.3.2 Simulatives Verfahren 27

2.3.3 Fuzzylogik 29

2.4 Grundlagen des strukturellen Komplexitätsmanagements 31

3 Stand der Forschung 35

3.1 Prozess der Fabrikplanung 35

3.1.1 Klassische Prozessmodelle der Fabrikplanung 35

3.1.2 Modulare und kontinuierliche Prozessmodelle der Fabrikplanung 38

3.2 Methoden zur Planung veränderungsfähiger Fabriken 40

3.2.1 Systematik der Wandlungsfähigkeit nach HERNÁNDEZ MORALES (2003) 40

3.2.2 Planungsmethode für Rekonfigurationsprozesse nach CISEK (2005) 42

3.2.3 Methode zur partizipativen Fabrikplanung nach GÜNTHER (2005) 42

3.2.4 Planung einer wandlungsfähigen vernetzten Produktion nach LÖFFLER (2011) 43

3.2.5 Methode zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit nach KOCH (2011) 44

3.2.6 Methode zur Adaption von Produktionsstrukturen nach POHL (2014) 46

3.2.7 Planung der systematischen Wandlungsfähigkeit nach KLEMKE (2014) 47

3.2.8 Gestaltung veränderungsfähiger Produktionssysteme nach BENKAMOUN (2016) 48

3.2.9 Zusammenfassende Bewertung der Planungsmethoden 49

3.3 Bewertungsmethoden für veränderungsfähige Fabrikstrukturen 51

3.3.1 Bewertung strukturvariabler Produktionssysteme nach SESTERHENN (2003) 52

3.3.2 Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten nach HEGER (2007) 52

3.3.3 Wirtschaftlichkeitsbewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme nach MÖLLER (2008) 53

3.3.4 Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung nach RÜHL (2010) 56

3.3.5 Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Unsicherheit nach KREBS (2012) 56

3.3.6 Zusammenfassende Bewertung der Bewertungsmethoden 58

3.4 Ontologie der Veränderungsfähigkeit 60

3.4.1 Aufbau der Ontologie 60

3.4.2 Veränderungsstrategien 62

3.4.3 Veränderungsbefähiger 62

3.4.4 Veränderungstreiber 64

3.5 Defizite vorhandener Methoden 65

4 Anforderungen an die Methode und Forschungsfragen 69

4.1 Inhaltliche Anforderungen 69

4.2 Anwendungsbezogene Anforderungen 70

4.3 Forschungsfragen 71

5 Methode zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen 73

5.1 Vorgehensmodell der Methode – ein Überblick 73

5.2 Schritt 1: Modellierung und Analyse des Planungsprozesses 75

5.3 Schritt 2: Modellierung von Unschärfen und deren Wirkbeziehungen 80

5.3.1 Klassifizierung und Modellierung der Unschärfen 81

5.3.2 Identifikation von Wirkbeziehungen zwischen unscharfen Parametern 86

5.4 Schritt 3: Unschärfefortpflanzungsanalyse 90

5.4.1 Bestimmung der Unschärfe abhängiger Planungsparameter 90

5.4.2 Ableitung unschärfebezogener Handlungsempfehlungen 100

5.5 Schritt 4: Auswahl und Dimensionierung relevanter Veränderungsbefähiger 103

5.5.1 Vorauswahl realisierbarer Veränderungsbefähiger 103

5.5.2 Unschärfebasierte Dimensionierung relevanter Veränderungsbefähiger 105

5.6 Schritt 5: Veränderungsbefähiger-Kombination 109

5.6.1 Einflussanalyse der Veränderungsbefähiger 109

5.6.2 Kombination von Veränderungsbefähigern zu alternativen Fabrikstrukturvarianten ... 118

5.7 Schritt 6: Bewertung der Veränderungsbefähiger-Kombinationen ... 123

5.7.1 Bewertung der alternativen Fabrikstrukturvarianten ... 123

5.7.2 Zuordnung der Fabrikstrukturvarianten zu Veränderungsstrategien ... 125

5.8 Fazit ... 128

6 Anwendung und Bewertung der Methode ... 131

6.1 Einführung in den Anwendungsfall ... 131

6.2 Anwendung der Methode ... 132

6.2.1 Schritte 1 und 2: Analyse des Planungsprozesses und Modellierung der Unschärfen ... 132

6.2.2 Schritt 3: Unschärfefortpflanzungsanalyse und Handlungsempfehlung ... 135

6.2.3 Schritte 4 und 5: Auswahl, Dimensionierung und Kombination der Veränderungsbefähiger ... 138

6.2.4 Schritt 6: Bewertung der Fabrikstrukturvarianten ... 144

6.3 Kosten-Nutzen-Analyse der entwickelten Methode ... 148

6.4 Bewertung und Diskussion der entwickelten Methode ... 151

7 Zusammenfassung und Ausblick ... 157

Anhang ... 161

Literaturverzeichnis ... 185

Abkürzungsverzeichnis

A	Anforderung
Abb.	Abbildung
AP	Arbeitsplatz
AR	Augmented Reality
BEV	Battery Electric Vehicle (Elektroauto)
BK	Beeinflussungskennzahl
BM	Betriebsmittel
BMW	Bayerische Motoren Werke
CAD	Computer-Aided Design
cmt	Complexity Management Tool
DIN	Deutsche Industrienorm
diskr.	diskret
DLZ	Durchlaufzeit
DSM	Design-Struktur-Matrix
EHB	Elektrohängebahn
F	Forschungsfrage
FEC	Future Environmental Condition (zukünftiger Umweltzustand)
FGF	Fabrikgestaltungsfeld
FTS	Fahrerloses Transportsystem
IFMA	International Facility Management Association
IT	Informationstechnik
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
IuK	Informations- und Kommunikationstechnik
Kap.	Kapitel
KEP	Kundenentkopplungspunkt
kont.	kontinuierlich
MAX	Maximum

MIN	Minimum
MTTR	Mean-Time-To-Repair
MVA	Market Value Added
Ordn.	Ordnung
P&P	Plug & Produce
PDCA	Plan-Do-Check-Act
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug)
PKW	Personenkraftwagen
PP	Planungsparameter
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung
RO	Referenzobjekt
SIPOC	Supplier-Input-Process-Output-Customer
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TE	Transporteinheit
TGA	Technische Gebäudeausstattung
VBA	Visual Basic for Applications
VBF	Veränderungsbefähiger
VBF_1	Primärbefähiger
VBF_2	Sekundärbefähiger
VBF_3	Tertiärbefähiger
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VR	Virtual Reality
WKV	Wahrscheinlichkeitsverteilung
WT	Werkzeugtechnologie

Verzeichnis der Formelzeichen

$\mathbb{R}$	Menge der reellen Zahlen

Wahrscheinlichkeitstheorie (kontinuierliche Verteilungen)

f	Dichtefunktion
F	Verteilungsfunktion
X	stetige Zufallsvariable
x	Ausprägung der Zufallsvariable X
a	untere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung
b	obere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung
c	wahrscheinlichster Wert der Dreiecksverteilung („Dreiecksspitze“)
e	Eulersche Zahl (Konstante)
α	Parameter der logistischen, Exponential- und Weibullverteilung
β	Parameter der logistischen, Extremal-I-Verteilung und Weibullverteilung
μ	Erwartungswert, arithmetischer Mittelwert
π	Kreiszahl (Konstante)
σ	Standardabweichung

Wahrscheinlichkeitstheorie (diskrete Verteilungen)

f	Zähldichte der Verteilung
X	diskrete Zufallsvariable
x	Ausprägung der Zufallsvariable X
N	Umfang der Grundgesamtheit
n	Stichprobenumfang, Teilmenge der Grundgesamtheit
M	Anzahl Elemente der Grundgesamtheit, für die ein Ereignis eintritt
i	Laufvariable bei der Summenbildung
k	Anzahl Elemente der Stichprobe n, für die ein Ereignis eintritt
P	Wahrscheinlichkeitsmaß für die Gesamtwahrscheinlichkeit einer Aussage
p	Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines (Einzel-)Ereignisses

r	Anzahl Elemente mit Eigenschaft 1 der Stichprobe n aus einer dichotomen Grundgesamtheit (Elemente der Grundgesamtheit werden durch 2 unterschiedliche Eigenschaften voneinander differenziert), für die ein Ereignis eintritt

Fuzzy-Set-Theorie

X	Grundmenge
x	Element der Grundmenge X
A	unscharfe Menge in X
μ	Zugehörigkeitsfunktion
L	unscharfe Menge *langsame Geschwindigkeit*
M	unscharfe Menge *mittlere Geschwindigkeit*
S	unscharfe Menge *schnelle Geschwindigkeit*

Unschärfefortpflanzung

f	Berechnungsvorschrift des Wirkungsgefüges
X_i	Einflussparameter i
x_i	Wert des Einflussparameters i
n	Anzahl der Einflussparameter
y	abhängiger Parameter, Ausgangsparameter
E, μ	Erwartungswert, arithmetischer Mittelwert
σ	Standardabweichung
Var	Varianz
r	Anzahl der Regeln (Regelbasis Fuzzylogik)
Anz_{BM}	Anzahl der Betriebsmittel
$Kapa_{BM}$	Kapazität der Betriebsmittel
A_{BM}	Grundfläche des Betriebsmittels
A_{BMzus}	Zusatzfläche
A_{fert}	Fertigungsfläche
FKZ	Flächenkennzahl
s	Absatzstückzahl

Strukturelles Komplexitätsmanagement

AS_i	Aktivsumme des Planungsparameters i

PS_i	Passivsumme des Planungsparameters i
Akt_i	Aktivität des Planungsparameters i
$Krit_i$	Kritikalität des Planungsparameters i

Primärerhebungsmethoden

n	Stichprobenumfang, Teilmenge der Grundgesamtheit

Regressionsanalyse

n	Stichprobenumfang, Teilmenge der Grundgesamtheit

Entwickelte Methode

Anz_{Takte}	gesamte Anzahl Takte
$Anz_{Derivate}$	Anzahl Derivate
FT	Fertigungstiefe
EK	Elektrifizierungskennzahl
$A_{Montage}$	Montagefläche
AG	Automatisierungsgrad
FK_{max}	größte produzierte Fahrzeugklasse
RO	Referenzobjekt
M_{RO}	Modellierbarkeit des Referenzobjekts RO
i	Index Tertiärbefähiger
j	Index Sekundärbefähiger
k	Index Tertiärbefähiger-Kombination
EG	Erfüllungsgrad
n	Anzahl der Tertiärbefähiger eines Sekundärbefähigers
Ist	Ist-Wert eines Tertiärbefähigers
$Ideal$	Idealwert eines Tertiärbefähigers
$Plan$	(neuer) Planwert eines Tertiärbefähigers
BK	Beeinflussungskennzahl
$RefAkt$	Referenzaktion
Rel	gewichtete Wirkbeziehung
l	Index Beeinflussungsstufe Wirkungsnetz
m	Anzahl der Beeinflussungsstufen
KG	Kompensationsgrad

1 Einleitung

„In einem wankenden Schiff fällt um,
wer stillsteht und sich nicht bewegt."
— *CARL LUDWIG BÖRNE,* deutscher Journalist und Schriftsteller

1.1 Motivation

„Deutschland geht es gut" – mit diesen Worten betrieb Bundeskanzlerin Angela Merkel 2017 Wahlkampf (GROSSE-BRÖMER & STRAUBINGER 2017). Wird dieser Slogan in Bezug zur derzeitigen wirtschaftlichen Lage gesetzt, wird ersichtlich, dass das produzierende Gewerbe eine zentrale Bedeutung für den Wohlstand Deutschlands innehat: Die Bruttowertschöpfung[1] des produzierenden Gewerbes in Deutschland ist seit 2009 um 40 % auf heute 859 Mrd. EUR gestiegen (STATISTISCHES BUNDESAMT 2017A). Die hierzulande produzierten Güter tragen zu 66 % der Gesamtexportleistung bei (STATISTISCHES BUNDESAMT 2017B, S. 19) und Deutschland ist seit 1990 kontinuierlich unter den drei größten Exportnationen[2] im Welthandel (STATISTISCHES BUNDESAMT 2010, S. 40).

Die hohe Exportorientierung hat für die deutsche Wirtschaft jedoch auch Nachteile: Durch die starke Verflechtung der deutschen Industrie mit der Weltwirtschaft ist diese „besonders anfällig für Konjunkturschwankungen" (REUTER 2015, S. 2). Es ist daher unerlässlich, dass die in Deutschland produzierenden Unternehmen und deren Fabriken anpassungs- und veränderungsfähig sind (CLAUSSEN 2012, S. 1), um vor dem Hintergrund zunehmender weltweiter Konjunkturschwankungen und Marktvolatilitäten, kürzer werdender Produktlebenszyklen sowie dem Kundenwunsch nach stärkerer Individualisierung und dem damit einhergehenden Anstieg der Variantenzahl (NYHUIS ET AL. 2004, ELMARAGHY 2009, v, KARL ET AL. 2012) langfristig erfolgreich zu sein (WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2000, S. 37).

[1] Die Bruttowertschöpfung umfasst den Gesamtwert der im Produktionsprozess erzeugten Waren und Dienstleistungen (Produktionswert), abzüglich des Werts der Vorleistungen.
[2] Gemessen am Absolutwert der Ausfuhren in US-Dollar.

Veränderungen, die durch das turbulente Unternehmensumfeld induziert werden, sind dabei unvermeidlich (ELMARAGHY 2009, S. v). Diese führen zu Unsicherheit und Volatilität der Märkte, wodurch eine Prognose zukünftiger Entwicklungen, wie beispielsweise der Nachfrage nach bestimmten Produkten, zunehmend erschwert wird (WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2000, CISEK ET AL. 2002). Auf diese Weise wird eine unscharfe Datengrundlage hervorgerufen, die eine der wesentlichen zukünftigen Herausforderungen für die Fabrikplanung darstellt (WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2000). Die Berücksichtigung der Unschärfe ist sinnvoll und wichtig, da eine rein deterministische Planung und die damit einhergehende Vernachlässigung von Unschärfen der Planungsdaten[3] zu einem suboptimalen Planungsergebnis führt (SCHENK ET AL. 2014A, S. 768). Als zentrale Hypothese dieser Arbeit wird angenommen, dass Unsicherheit und Unschärfe[4] der Planungsdaten durch eine geeignete Veränderungsfähigkeit[5] der Fabrikstrukturen kompensiert werden können. Diese Hypothese wird auch in der einschlägigen Literatur, beispielsweise von KIRCHNER ET AL. (2003, S. 256), ROSCHER (2008, S. 82), NYHUIS (2010, S. 29) und PLEHN ET AL. (2015A), propagiert.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Eine Fabrik kann durch den Einsatz sog. Veränderungsbefähiger[6] veränderungsfähig gestaltet werden. Beispielhaft sind in Abb. 1.1 fünf konkrete Veränderungsbefähiger dargestellt und quantifiziert: Durch das Vorhalten von Reserve- und Erweiterungsflächen (1) können zukünftig wachsende Produktionskapazitäten einfacher realisiert werden. Eine flächendeckend gleiche und hohe Bodenbelastbarkeit (2) fördert ebenso wie ein großes Säulenraster (5) die Mobilität und restriktionsfreie Platzierung von Betriebsmitteln. Breit dimensionierte Wege (3) ermöglichen den Verkehr unterschiedlicher, auch für zukünftige Anforderungen geeigneter Flurförderfahrzeuge. Universell nutzbare Fördertechnik, wie der in Abb. 1.1 dargestellte Hängeförderer (4), kann so konzipiert sein, dass sie auch für ggf. zukünftig zu produzierende Produkte geeignet ist.

[3] Der Begriff Planungsdaten wird in Kap. 2.1.2 definiert.
[4] Während sich Unsicherheit auf einen Mangel an Information hinsichtlich des Eintretens eines Ereignisses bezieht (KREBS 2012, S. 18-21), wird der Begriff Unschärfe in Bezug auf inexakte Daten und Informationen verwendet (FORTE 2002, S. 74–75). Die Begriffe Unsicherheit und Unschärfe werden in Kap. 2.1.4 definiert.
[5] Veränderungsfähigkeit wird i. a. A. HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 8) und PLEHN ET AL. (2015A) als Überbegriff für Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit verwendet (siehe Kap. 2.1.3).
[6] Der Begriff Veränderungsbefähiger wird in Kap. 2.1.3 definiert.

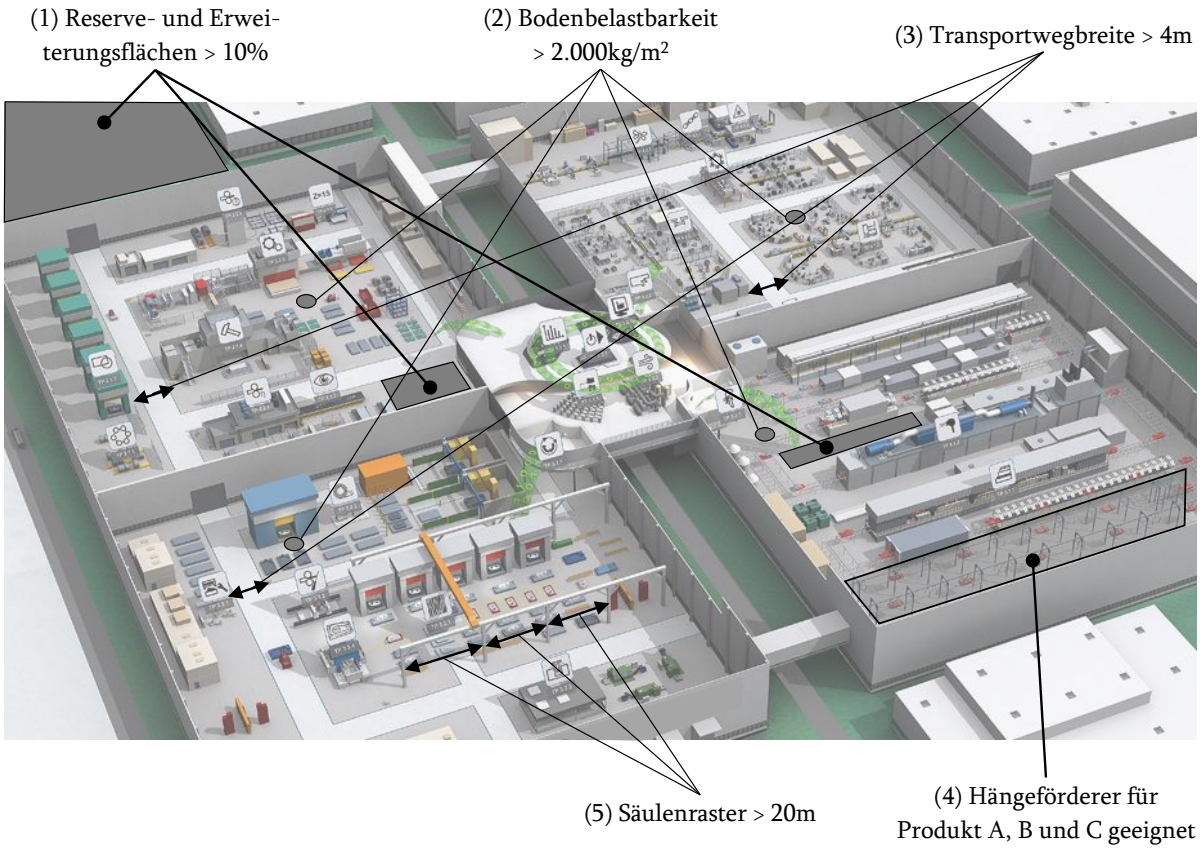


Abb. 1.1: Beispielhafte Visualisierung von Veränderungsbefähigern einer Fabrik (Bildquelle: FRAUNHOFER IWU 2017).

Ziel dieser Arbeit ist es, eine optimale Veränderungsfähigkeit der Fabrikstrukturen durch den effizienten Einsatz von Veränderungsbefähigern zu erreichen (ELMARAGHY 2009, S. v). Optimal bedeutet dabei, dass die Veränderungsbefähiger gezielt die vorhandenen Unschärfen adressieren und kompensieren sollten und die Kosten bei der Auswahl und Auslegung der Veränderungsbefähiger berücksichtigt werden. Ein wesentlicher Aspekt der Arbeit ist der Einbezug von Wirkbeziehungen zwischen den Veränderungsbefähigern bei deren Auswahl und Kombination. Diese Beziehungen sind lt. NYHUIS (2010, S. 27) und BENKAMOUN (2016, S. 125) von großer Bedeutung, werden jedoch bei den existierenden Methoden zur Planung veränderungsfähiger Fabriken nicht berücksichtigt. Eine optimale Veränderungsfähigkeit kann nur durch die zielgerichtete Bündelung von Veränderungsbefähigern unter Einbezug der bestehenden Wirkbeziehungen erreicht werden (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 56).

Da die Umsetzung der Veränderungsbefähiger mit z. T. hohen Kosten einhergeht, müssen die zu kompensierenden Unschärfen zuvor so exakt wie möglich identifiziert, klassifiziert und anschließend modelliert werden. Je besser eine Unschärfe dem Planenden durch eine

geeignete Modellierung (z. B. in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung) bekannt ist, desto gezielter lassen sich die Veränderungsbefähiger auswählen und dimensionieren. Die Umsetzung aller Befähiger ist aufgrund der hohen Kosten wirtschaftlich nicht sinnvoll (NYHUIS 2010, S. 30). Obwohl in den meisten Unternehmen ein Bedarf zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit besteht, wie eine Studie von KIRCHNER ET AL. (2003, S. 259) zeigt, ist auch eine Überdimensionierung, wie sie in klassischen Fabrikplanungsansätzen durch den Einsatz von Flexibilität oft erfolgt (ERLACH & FOITH-FÖRSTER 2014), unbedingt zu vermeiden. Es wird ersichtlich, dass Flexibilität und Wandlungsfähigkeit[7] gemeinsam in einem ganzheitlichen Ansatz geplant werden müssen und nicht getrennt voneinander betrachtet werden können (NYHUIS 2010, S. 24). Dies soll in der vorliegenden Arbeit durch den Einsatz von Veränderungsbefähigern erreicht werden, von denen ein Teil Flexibilität, ein anderer Teil Wandlungsfähigkeit erzeugt. Als dritte Veränderungsstrategie ist aufgrund der ebenfalls großen Bedeutung in der Literatur (siehe Kap. 3.4.2) Robustheit einzubeziehen. Zusammenfassen lassen sich die übergeordneten Ziele dieser Arbeit in zwei Punkten:

- Die Planenden werden befähigt, auf Basis der Unschärfe der Planungsdaten Fabrikstrukturen mit einer optimalen Ausprägung der Veränderungsfähigkeit zu planen.
- Die Effizienz der Planung wird durch die Verringerung von Fehlplanungen und Überdimensionierung erhöht und langfristig der Kapitalwert verbessert.

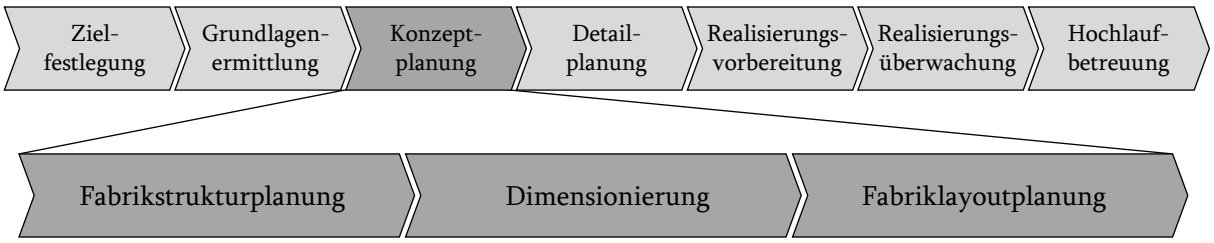
Um diese Ziele zu erreichen, ist eine Methode zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Planungsdaten zu entwickeln. Die Methode soll die in Kap. 4 spezifizierten Anforderungen erfüllen.

1.3 Spezifizierung des Untersuchungsbereichs

Die in dieser Arbeit entwickelte Methode bezieht sich auf die Phase der Konzeptplanung (VDI 5200), die sich weiter in drei Planungsschritte unterteilen lässt: Fabrikstrukturplanung, Dimensionierung und Layoutplanung. Diese Planungsschritte umfassen die in Abb. 1.2 dargestellten Aufgaben (siehe u. a. AGGTELEKY 1987, S. 32, SCHENK ET AL. 2014A, S. 320, PAWELLEK 2008, S. 52, VDI 5200, S. 12-13)[8]:

[7] Die Begriffe Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit werden in Kap. 2.1.3 definiert. Eine Erläuterung des Begriffs Veränderungsstrategie erfolgt in Kap. 3.4.2.

[8] Es sei angemerkt, dass die Abgrenzung der genannten Planungsschritte zueinander in der Literatur nicht einheitlich erfolgt (siehe Kap. 3.1.1). Bei widersprüchlichen Angaben wurde das Phasenmodell nach VDI 5200 für die Zuordnung der Aufgaben zugrunde gelegt.



- Festlegung des Produktionsablaufschemas auf Basis des Produktsortiments
- Festlegung der einzusetzenden Produktionstechnologien
- Ermittlung der Kommunikations- und Transportbeziehungen (Materialflussplanung)
- Gliederung und Grobanordnung der Funktionsbereiche (z.B. Fertigung, Montage, Logistik)
- Ermittlung geeigneter Maßnahmen zur Realisierung der benötigten Veränderungsfähigkeit
- Ausarbeitung eines idealen Funktionsschemas auf Basis unterschiedlicher Varianten

- Ermittlung der benötigten Produktionskapazität auf Basis der vorzusehenden Produktionsmenge
- Festlegung des qualitativen und quantitativen Betriebsmittelbedarfes
- Planung des Personalbedarfes und des Schichtmodells
- Ermittlung des Flächen- und Raumbedarfs der Funktionsbereiche
- Ausarbeitung des flächenmaßstäblichen Funktionsschemas

- Festlegung der räumlichen Anordnung von Betriebs- und Transportmitteln, Förder- und Anlagentechnik, Arbeitsplätzen, Medienversorgung, etc.
- Vorplanung der Gebäudehülle einschließlich Tragwerk
- Ausarbeitung eines Ideallayouts (ohne Berücksichtigung von Restriktionen)
- Aufnahme layoutrelevanter Restriktionen
- Ausarbeitung mehrerer alternativer Reallayoutvarianten
- Bewertung (qualitativ, quantitativ, monetär) der Reallayoutvarianten und Auswahl einer Vorzugsvariante

Abb. 1.2: Spezifizierung des Untersuchungsbereichs anhand des Phasenmodells der Fabrikplanung nach VDI 5200.

Die Anwendung der Methode in der Konzeptplanungsphase ist sinnvoll, da die Fabrikstruktur ein wesentliches Element zur Gestaltung der Veränderungsfähigkeit einer Fabrik darstellt (AGGTELEKY 1987, S. 144, SCHUH ET AL. 2013, ERLACH & FOITH-FÖRSTER 2014). Die Dimensionierung und Layoutplanung sind relevant, da bestimmte Veränderungsbefähiger die Ergebnisgrößen dieser Planungsphasen direkt beeinflussen. Eine Spezifizierung des Untersuchungsbereichs nach Fabrikebenen kann i. A. a. WIENDAHL ET AL. (2007), wie in Abb. 1.3 dargestellt, erfolgen. Die entwickelte Methode bezieht sich auf Objekte der Ebenen Bereich/Segment, Linie und Zelle/Gruppe. Die Bezugsobjekte sind in Abb. 1.3 expliziert. Im Rahmen der Planungsmethode erfolgt eine Anordnung, Dimensionierung und/oder Selektion der Bezugsobjekte, wobei in Abb. 1.3 durch einen Punkt dargestellt wird, ob die Operation auf das entsprechende Bezugsobjekt der Fabrik zutrifft.

Die Methode ist konzipiert für große produzierende Unternehmen[9], da erst für eine hohe Investitionssumme und damit für eine große Fabrik der Nutzen der Methode den Anwendungsaufwand übersteigt (siehe Kap. 6.4). Es zählen jedoch auch Beratungsunternehmen, die im Bereich der Fabrikplanung aktiv sind und größere Planungsprojekte bei produzierenden Unternehmen durchführen, zum Anwenderkreis der Methode.

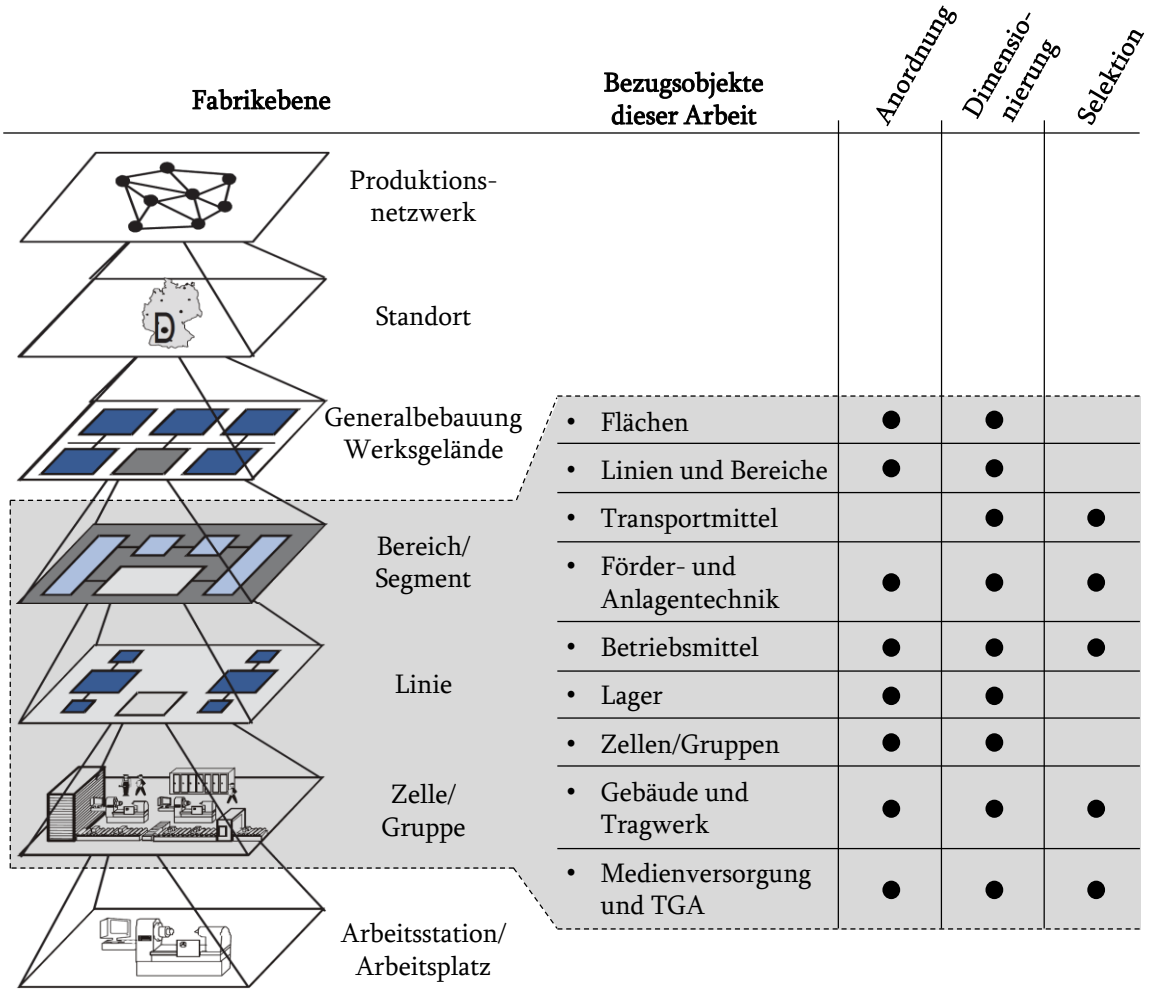


Abb. 1.3: Spezifizierung des Untersuchungsbereichs anhand der Fabrikebenen nach WIENDAHL ET AL. (2007).

Eine weitere Randbedingung für die Anwendung der Methode ist ein hinreichend großer Umfang des Planungsprojekts: Die Betrachtung einer Vielzahl von Veränderungsbefähigern ist nur dann sinnvoll, wenn wesentliche Veränderungen an der Fabrikstruktur[10] vorgenommen werden und dadurch eine Anpassung der Veränderungsfähigkeit ermöglicht wird. Beispiele für die Veränderung oder Neugestaltung der Fabrikstruktur sind die nach

[9] Große Unternehmen werden nach der Definition der EUROPÄISCHEN KOMMISSION (2003) von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) unterschieden und weisen einen Jahresumsatz über 50 Mio. Euro und mehr als 250 Mitarbeiter auf.

[10] Die Definition des Begriffs Fabrikstruktur erfolgt in Kap. 2.1.1.

GRUNDIG (2009, S. 18-20) definierten Planungsgrundfälle[11] einer Fabrik (Neubau, Um- und Neugestaltung, Erweiterung, Rückbau und Revitalisierung), aber auch die Einführung neuer Produkte oder Produktionstechnologien, die einen Um- oder Ausbau und damit die Veränderungen der Strukturen in Teilbereichen der Fabrik zur Folge haben. Die Umgestaltung oder Neuplanung der Generalbebauung und des Werkgeländes sowie einzelner Arbeitsplätze oder -stationen ist dagegen nicht Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit.

1.4 Aufbau der Arbeit und methodisches Vorgehen

Die vorliegende Arbeit umfasst neun Kapitel, die in Tabelle 1.1 aufgeführt sind. Im ersten Kapitel werden die Zielsetzung erläutert, der Untersuchungsbereich der Arbeit spezifiziert sowie in diesem Abschnitt der Aufbau und das methodische Vorgehen beschrieben. Im zweiten Kapitel werden die zum Verständnis der Methode benötigten theoretischen Grundlagen erläutert und relevante Fachbegriffe definiert. Kapitel 3 umfasst die *terminologisch-deskriptive* (ULRICH & HILL 1976) Aufarbeitung des Standes der Forschung, in dem die für diese Arbeit relevanten existierenden Ansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen vorgestellt und diskutiert werden. Mithilfe einer sog. Ontologie (Kap. 3.4) werden Begriffszusammenhänge im Forschungsfeld der Veränderungsfähigkeit beschrieben. Die Grundlage für die Aufarbeitung des Standes der Forschung stellt eine systematische Literaturrecherche dar. Die Ableitung eines Handlungsbedarfs aus den Defiziten der bestehenden Ansätze schließt Kapitel 3 ab. In Kapitel 4 werden aus den identifizierten Defiziten Anforderungen an die Methode sowie zu beantwortende Forschungsfragen abgeleitet und erläutert.

Das fünfte Kapitel gibt zunächst einen Überblick über die Schritte der entwickelten Methode und führt die relevanten methodischen Grundlagen auf.

Weiterhin wird in Kapitel 5 die Gesamtmethode zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen detailliert erläutert. Dazu gehört zum einen die Teilmethode zur Modellierung und Analyse der Unschärfen im Fabrikplanungsprozess. Im Rahmen der Entwicklung die-

[11] Eine Detaillierung der Planungsgrundfälle nach GRUNDIG (2009, S. 18-20) kann Anhang A entnommen werden.

ser Teilmethode wurde eine erste Reihe von Experteninterviews durchgeführt, die der Primärerhebungsmethode der semi-standardisierten leitfadenbasierten Interviews[12] zuzuordnen ist (STIER 1999, S. 184).

Die Ziele der ersten Interviewreihe mit 18 Experten[13] aus 17 Unternehmen (siehe Anhang B) sind:

1. die Identifikation in der Praxis relevanter Planungsparameter und deren Unschärfen,
2. die Aufnahme in der fabrikplanerischen Praxis typischer Prozessabfolgen („Best Practice“) und
3. die Identifikation von Veränderungsbefähigern.

Der in diesen Interviews verwendete Leitfaden ist in Anhang C dargestellt.

Zum anderen wird in Kapitel 5 die entwickelte zweite Teilmethode zur unschärfebasierten Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen detailliert erläutert. Ein sog. Referenzkatalog der Veränderungsbefähiger wird auf Basis einer umfassenden Literaturanalyse und der Ergebnisse der ersten Experteninterviewreihe entwickelt. Die Identifikation der Wirkbeziehungen zwischen den Veränderungsbefähigern ist Ziel der zweiten Interviewreihe mit 17 Experten[14] aus neun Unternehmen (siehe Anhang B). Diese Interviews wurden mithilfe eines rechnerbasierten Erhebungswerkzeugs zur Befragung der Experten standardisiert, das die Reihenfolge der Fragen exakt vorgibt.

---

[12] Nach KORNMEIER (2007, S. 167) werden standardisierte und freie Interviews unterschieden. Bei standardisierten Interviews sind die Reihenfolge und der Inhalt der Fragen in einem Leitfaden festgelegt, von dem im Interviewverlauf nicht abgewichen wird. Ein freies Interview beinhaltet keine festgelegte Reihenfolge der Fragen, Erläuterungen können durch den Interviewenden hinzugefügt werden, die Fragen sind frei formulierbar. STIER (1999, S. 184) unterscheidet außerdem das semi-standardisierte oder teil-strukturierte Interview, bei dem zwar ein Leitfaden die Fragen exakt vorgibt, deren Reihenfolge aber im Laufe des Interviews durch den Interviewenden frei gewählt werden kann.

[13] AYYUB (2001, S. 114) definieren den Begriff Experte als „eine fachkundige Person, die über eine weitreichende Ausbildung und Wissen in einem spezifischen Bereich verfügt.“ Eine erweiterte Definition wird von BOGNER ET AL. (2014, S. 13) angeführt: „Experten lassen sich als Personen verstehen, die sich – ausgehend von einem spezifischen Praxis- oder Erfahrungswissen, das sich auf einen klar begrenzbaren Problemkreis bezieht – die Möglichkeit geschaffen haben, mit ihren Deutungen das konkrete Handlungsfeld sinnhaft und handlungsleitend für Andere zu strukturieren.“ Dieser Definition wird in der vorliegenden Arbeit gefolgt.

[14] Aus Gründen der Lesbarkeit und der Brevität wird bei Personenbezeichnungen die männliche Form gewählt, es ist jedoch immer sowohl die weibliche als auch die männliche Form gemeint.

Somit lässt sich diese zweite Befragung der Erhebungsmethode der standardisierten Experteninterviews nach KORNMEIER (2007, S. 167) und STIER (1999, S. 184) zuordnen.

Für die Analyse, welcher Veränderungsbefähiger geeignet ist, um die unterschiedlichen Unschärfen zu kompensieren, wurde eine Onlineumfrage (n = 28) mit Personen, die im Bereich der Fabrikplanung tätig sind, durchgeführt. Eine schematische Darstellung der Umfragestruktur ist in Anhang D aufgeführt, die Ergebnisse sind in Kap. 5.5 und Anhang E detailliert.

Kapitel 6 umfasst die Anwendung und Bewertung der entwickelten Methode. Die Anwendung erfolgt anhand eines realen Fallbeispiels in der Industrie, das auch eine monetäre Betrachtung des Aufwand-Nutzen-Verhältnisses beinhaltet. Die Bewertung und Validierung der Methode mit Bezug auf die in Kap. 4 definierten Anforderungen wird zum einen auf Basis der Anwendungsergebnisse und -erfahrungen durchgeführt. Um auch die Erfüllung der Anforderungen in anderen Branchen und Unternehmen zu prüfen, wurden zum anderen sog. Validierungsgespräche im Rahmen einer dritten Reihe von Experteninterviews durchgeführt. Diese Art der Interviews wird nach KAISER (2014, S. 34-35) auch als Plausibilisierungsgespräch bezeichnet, dessen Ergebnisse nicht unmittelbar in die Methodenentwicklung einfließen. Ziel des Plausibilisierungsgesprächs ist vielmehr eine Überprüfung der Relevanz und Verständlichkeit und damit der Anwendbarkeit der Methode durch eine nicht-wissenschaftliche Zielgruppe (KAISER 2014, S. 34-35).

Die Aufnahme von Expertenwissen im Rahmen von Interviews stellt eine Aggregation beobachtbarer Zusammenhänge und Einzelfälle dar. Die Ableitung generalisierter, allgemeingültiger Modelle und Vorgehensweisen aus diesen Einzelbeobachtungen kann nach ULRICH & HILL (1976) als *empirisch-induktiver* Forschungsansatz bezeichnet werden (siehe Tabelle 1.1). Die anschließende Verwendung der Methode zur Ableitung situationsspezifischer Handlungsempfehlungen (z. B. zur Reduktion bestimmter Unschärfen (Kap. 5.4.2) oder zur Bildung bestimmter Kombinationen der Veränderungsbefähiger (Kap. 5.6.2)) kann, wie in Tabelle 1.1 dargestellt, dem *analytisch-deduktiven* Vorgehen zugeordnet werden (ULRICH & HILL 1976, HELFRICH 2016, S. 31-32). Um in der vorliegenden Arbeit eine klare Abgrenzung zwischen den angewendeten Forschungsansätzen zu gewährleisten, sind in Kapitel 5 die empirisch-induktiven Abschnitte entsprechend gekennzeichnet.

Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftig relevante Forschungsaktivitäten in Kapitel 9 abgeschlossen.

Tabelle 1.1: Aufbau der Arbeit und forschungsmethodisches Vorgehen.

Kapitel	Bezeichnung	Forschungsansatz	
1	Einleitung		
2	Grundlagen	terminologisch-deskriptiv	
3	Stand der Forschung	terminologisch-deskriptiv	
4	Anforderungen an die Methodik und Forschungsfragen		
5	Methodik zur Planung veränderungs-fähiger Fabrikstrukturen	Wissenserhebung: empirisch-induktiv	Methodenentwicklung: analytisch-deduktiv
6	Anwendung und Bewertung der Methodik	empirisch-induktiv	
7	Zusammenfassung und Ausblick		

2 Grundlagen

Dieses Kapitel umfasst eine Erläuterung der für die vorliegende Arbeit relevanten Grundlagen. Zunächst werden zur Herstellung eines einheitlichen Verständnisses relevanter Fachbegriffe literaturbasierte Erklärungen und darauf aufbauend Definitionen (Kap. 2.1) gegeben. Anschließend werden Grundlagen zur Unschärfe- und Unsicherheitsmodellierung, -klassifizierung (Kap. 2.2) und -fortpflanzung (Kap. 2.3) sowie zum strukturellen Komplexitätsmanagement (Kap. 2.4) aufgearbeitet.

2.1 Begriffsdefinitionen

2.1.1 Fabrik, Fabrikstruktur und Fabrikplanung

Eine **Fabrik** ist ein „Ort, an dem Wertschöpfung durch arbeitsteilige Produktion industrieller Güter unter Einsatz von Produktionsfaktoren[15] stattfindet" (VDI 5200, S. 3).
In der Literatur wird häufig der Systembegriff mit der Fabrik in Verbindung gebracht, so z. B. in den Ausführungen von SCHUH ET AL. (2006, S. 169) und PLEHN ET AL. (2015B) oder der Arbeit von CLAUSSEN (2012, S. 87-90). In diesem Zusammenhang wird von **Fabriksystemen** gesprochen. Die Struktur dieser Fabriksysteme (kurz: **Fabrikstruktur**) „formt sich aus den Elementen der Fabrik und ihren Beziehungen. Das kleinste Element im Rahmen der Fabrikstrukturbetrachtung ist ein Betriebsmittel oder Handarbeitsplatz, welches in Verbindung mit einem oder mehreren Mitarbeitern die kleinste Struktureinheit bildet. Struktureinheiten lassen sich über die Detaillierungsebenen der Fabrik aggregieren." (SCHULZE ET AL. 2010, S. 815-816). Die genannten Fabrikebenen sind in Abb. 1.3 (Kap. 1.3) dargestellt.

[15] In der volkswirtschaftlichen Literatur werden Boden, Arbeit und Kapital (SMITH 2007, S. 45–46) als Produktionsfaktoren angeführt. In der Betriebswirtschaftslehre lassen sich nach GUTENBERG (1965, S. 4–7; 144–149) Elementarfaktoren (ausführende Arbeit, Betriebsmittel und Werkstoffe) und dispositive Faktoren (Leitung, Planung, Organisation und Überwachung) unterscheiden.

Der Begriff **Planen** ist definiert als „die gedankliche Vorwegnahme des zukünftigen Aufbaus und Ablaufs sowie von zukünftigen Zuständen und Prozessen eines Systems“ (Schmigalla 1995, S. 358). In dieser Arbeit wird die Definition lt. VDI-Richtlinie 5200 verwendet, wonach der Begriff **Fabrikplanung** beschrieben wird als „systematischer, zielorientierter, in aufeinander aufbauende Phasen strukturierter und unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen durchgeführter Prozess zur Planung einer Fabrik von der Zielfestlegung bis zum Hochlauf der Produktion“ (VDI 5200, S. 3).

2.1.2 Daten, Information und Wissen

Da die zu entwickelnde Methode auf Daten basiert, die einer Unschärfe unterliegen können, wird der Begriff **Daten** definiert als „Gebilde aus Zeichen oder kontinuierliche Funktionen, die aufgrund bekannter oder unterstellter Abmachungen Information darstellen, vorrangig zum Zwecke der Verarbeitung und als deren Ergebnis“ (DIN 44300). Nur wenn Daten in einem Bedeutungskontext stehen, werden diese zu **Informationen** (NORTH 1999, S. 40). **Wissen** als „die Gesamtheit der Kenntnisse, Fähigkeiten und Fertigkeiten, die Personen zur Lösung von Problemen einsetzen“ (PROBST ET AL. 2003, S. 22) entsteht aus der zweckorientierten Vernetzung von Informationen (STROHNER 1990). Wissen baut auf Daten und Informationen auf und kann implizit und damit personenbezogen oder explizit vorliegen und mithilfe geeigneter Medien aufgenommen, gespeichert und übertragen werden (NORTH 1999, S. 49–50).
In dieser Arbeit wird als Synonym für Planungsdaten der Begriff **Planungsparameter**[16] verwendet, dessen Singular in der einschlägigen Literatur geläufiger ist als der Singular Planungsdatum.

2.1.3 Veränderungsfähigkeit und Veränderungsbefähiger

Die Bedeutung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit einer Fabrik zur Beherrschung des turbulenten Unternehmensumfeldes ist in der Literatur weitgehend anerkannt (CISEK ET AL. 2002). Jedoch sind diese und weitere Fähigkeiten wie beispielsweise Robustheit oder

[16] Der Begriff Planungsparameter wird in dieser Arbeit verwendet für veränderliche Größen im Planungsprozess (z. B. Materialfluss, Fläche etc.), die das Ergebnis der Planung, die Fabrikstruktur, beeinflussen. Dabei ist streng abzugrenzen von der Verwendung des Parameterbegriffs in der Wahrscheinlichkeitstheorie, in der ein Parameter eine Konstante zur Beschreibung einer empirischen oder theoretischen Verteilung darstellt (HOLLAND ET AL. 2017).

Agilität nicht einheitlich definiert (OSTERMEIER 2015, S. 17, CISEK ET AL. 2002, PLEHN ET AL. 2015A). Es herrscht indes ein breiter Konsens darüber, dass die genannten Fähigkeiten unter dem Überbegriff der Veränderungsfähigkeit zusammengefasst werden können (PLEHN ET AL. 2015A, WIENDAHL ET AL. 2007, HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 8, ELMARAGHY 2009, S. vi, AZAB ET AL. 2013, NYHUIS ET AL. 2006). **Veränderungsfähigkeit** wird daher nach PLEHN ET AL. (2015A) definiert als „Überbegriff für spezifischere […] Fähigkeiten eines Systems, seine Struktur, Form oder Funktion unter akzeptablem Ressourcenaufwand (z. B. Zeit und Kosten) zu verändern".

Unter den o. g. spezifischeren Eigenschaften werden im Rahmen dieser Arbeit Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit fokussiert (Abb. 2.1). **Robustheit** ist die Fähigkeit eines Systems, unempfindlich gegenüber veränderlichen Umfeldeinflüssen zu sein (FRICKE & SCHULZ 2005, ROSS ET AL. 2008). Dabei wird ein für möglichst viele unterschiedliche Umweltzustände akzeptabler Zustand innerhalb vorbestimmter Robustheitsgrenzen angestrebt, ohne eine Anpassung des Systems vorzunehmen (ROSENBLATT & LEE 1987). Dieser Zustand ist jedoch in vielen Fällen suboptimal.

Flexibilität geht darüber hinaus: Sie ist die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich ohne großen finanziellen Investitionsaufwand durch vorgehaltene Maßnahmen oder Aktionskorridore an Umgebungsbedingungen anzupassen (REINHART 1997, WESTKÄMPER ET AL. 2000, SPATH ET AL. 2001, S. 236). DRABOW & WOELK (2004, S. 90) weisen darauf hin, dass mit dem Vorhalten von Flexibilität (z. B. durch zusätzliche Kapazität) eine Überdimensionierung einhergeht, die dauerhaft entsprechend hohe Betriebskosten verursacht (Abb. 2.1).

Diesem Problem wird durch die Wandlungsfähigkeit begegnet. **Wandlungsfähigkeit** wird als Potenzial verstanden, auch jenseits von durch Flexibilität vorgehaltenen Aktionskorridoren durch eine Verschiebung derselben (Abb. 2.1) irreversible Veränderungen bei Bedarf reaktionsfähig durchführen zu können (ZÄH ET AL. 2004, S. 173, NYHUIS 2010, S. 24–26, REINHART 1997, WESTKÄMPER ET AL. 2000). Damit ermöglicht es Wandlungsfähigkeit, auch auf unvorhersehbare Ereignisse adäquat zu reagieren und antizipative Anpassungen eines Produktionssystems vorzunehmen (ZÄH ET AL. 2004, S. 173).

Die Realisierung von Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wird in dieser Arbeit durch den Einsatz sog. Veränderungsbefähiger erreicht.

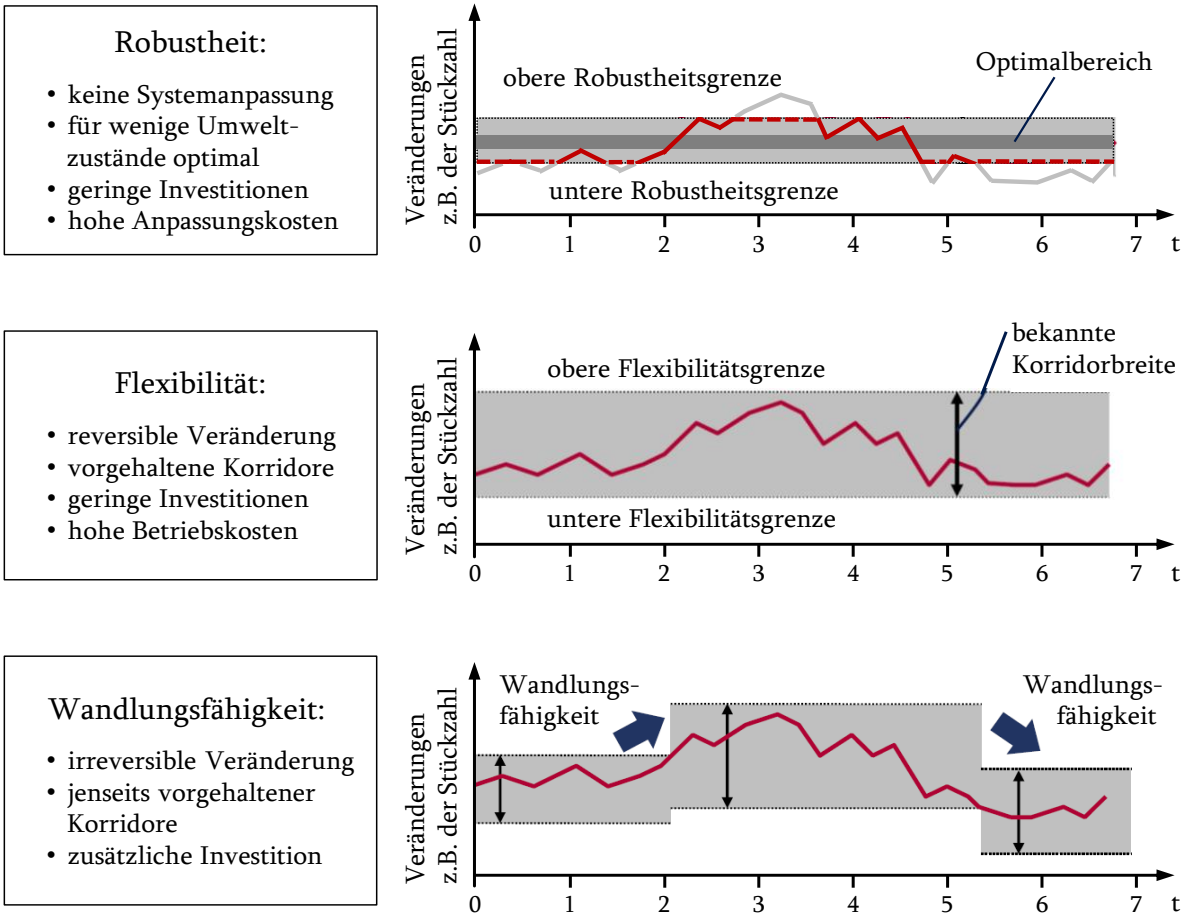


Abb. 2.1: Darstellung von Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit anhand von Aktionskorridoren (i. A. a. REINHART ET AL. 2008).

In Übereinstimmung mit den Ausführungen von HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 65) sowie HAWER ET AL. (2016B) werden **Veränderungsbefähiger** (kurz: VBF) definiert als „Eigenschaft, Maßnahme oder Konstrukt mit unterschiedlichen Abstraktionsgraden zur Förderung der abrufbaren und individuellen Fähigkeit eines Fabrikobjektes zum Wandel“. Es sei angemerkt, dass in der Literatur meistens von Wandlungsbefähigern mit alleinigem Bezug zur Wandlungsfähigkeit gesprochen wird. Diese Restriktion wird durch die Verwendung des Begriffs Veränderungsbefähiger aufgehoben. VBF können also Robustheit, Flexibilität oder Wandlungsfähigkeit fördern.[17]

[17] Für eine ausführlichere Diskussion von Veränderungsbefähigern, Veränderungsstrategien und Veränderungstreibern wird auf Kap. 3.4 verwiesen.

2.1.4 Unschärfe, Unsicherheit und verwandte Begriffe

Unschärfe, Unsicherheit und verwandte Begriffe wie beispielsweise *vage* oder *mehrdeutig* werden auf unterschiedliche, oft inkonsistente und widersprüchliche Weise angewendet (ZIMMERMANN 2001, S. 113, RASKIN & TAYLOR 2014, FORTE 2002, S. 73). Aus diesem Grund ist eine einheitliche Begriffsdefinition für die vorliegende Arbeit erforderlich.

Die Bedeutung des Begriffes **unscharf** weicht im umgangssprachlichen Gebrauch (im Sinne von *verschwommen, verwaschen, schwammig*) deutlich von der Bedeutung im wissenschaftlichen Bereich ab (RASKIN & TAYLOR 2014): Unscharf wird hier in Verbindung mit einem Adjektiv (*groß* ist unscharf, wobei *groß* eine sog. linguistische Variable darstellt, GROBELNY 1987, KREBS 2012, S. 42) oder Daten (der Materialfluss ist unscharf, sog. Fuzzy-Zahl, DIJKMAN ET AL. 1983) verwendet, sofern deren Bedeutung nicht eindeutig oder deren Wert nicht präzise quantifizierbar ist. In der Fuzzy-Set-Theorie bezieht sich Unschärfe auf graduelle Übergänge von einem Zustand in einen anderen bzw. auf Mengen, die nicht scharf voneinander getrennt werden können (LAKOFF 1987, ZADEH 1965). Aufgrund dieses sog. *Gradualness Phenomenon* kann die Zugehörigkeit eines Konzepts zu einer Menge nur zu einem bestimmten Grad, aber nicht vollständig vorhanden sein (DUBOIS & PRADE 2000, S. 27). **Unschärfe** wird für die vorliegende Arbeit definiert als „Ein Mangel an Wissen oder Information, der dazu führt, dass der bekannte Wert eines Referenzobjekts von der Realität abweicht". Konkretere Definitionen von Unschärfe sind nur in Bezug zu einem Referenzobjekt möglich, da der Begriff kontextabhängig verwendet wird (FORTE 2002, S. 69, ZIMMERMANN 2001, S. 6). Aus diesem Grund werden die folgenden für diese Arbeit relevanten Begriffskombinationen definiert:

- **Unscharfe Menge:** Mengen, deren Elemente eine teilweise, graduelle Zugehörigkeit zu ebendieser Menge aufweisen und gleichzeitig anderen Mengen zugehörig sein können (i. A. a. ZADEH 1965).[18]
- **Unscharfe linguistische Variable:** Variablen oder Parameter, deren Ausprägungen nur durch linguistische Terme (z. B. klein, mittel, groß) beschrieben werden können (i. A. a. REINHART ET AL. 2009, KREBS 2012, S. 42). Jeder dieser Terme bildet eine unscharfe Menge (RIGLING 2003, S. 6).

[18] Die mathematische Beschreibung dieses Sachverhalts erfolgt in Kap. 2.2.3.

- **Unscharfe Daten:** Ein inexakter Datensatz, dessen bekannte Werte von der Realität abweichen (HAWER ET AL. 2018).
- **Unscharfer Parameter:** Eine inexakte Einzelgröße (z. B. ein Planungsparameter), deren bekannter Wert von der Realität abweicht (HAWER ET AL. 2018).

Unsicherheit kann durch eine Betrachtung der möglichen Bezugsobjekte von Unschärfe differenziert werden (Abb. 2.2). Nach FORTE (2002, S. 74–75) bezieht sich Unsicherheit immer auf das Eintreten eines oder mehrerer Ereignisse, die zu unterschiedlichen Umweltzuständen (KREBS 2012, S. 18-21) führen. Unschärfe dagegen kann sich auf unterschiedliche Bezugsobjekte, beispielsweise Daten, Begriffe oder Gegenstände, beziehen (FORTE 2002, S. 74–75).

Bezug	Begriff	Daten	Ereignis
Unsicherheit	X	X	✓
Unschärfe	✓	✓	X

Abb. 2.2: Abgrenzung der Begriffe Unsicherheit und Unschärfe durch deren Bezugsobjekte (i. A. a. FORTE 2002, S. 74–75).

Unsicherheit wird i. A. a. SCHNEEWEIß (1991, S. 34–36) und KREBS (2012, S. 21) definiert als „Mangel an Wissen oder Information, der das Eintreten eines zukünftigen Umweltzustandes oder Ereignisses nicht mit Sicherheit vorhersehbar macht".

Unsicherheit als Zustand unvollständiger Information wird in der Entscheidungstheorie weiter untergliedert nach dem Bekanntheitsgrad von Umweltzuständen und deren jeweiligen Eintrittswahrscheinlichkeiten (KNIGHT 1964, S. 20–21), wie in Abb. 2.3 dargestellt: **Risiko** bezieht sich auf Situationen, in denen die Eintrittswahrscheinlichkeiten der unterschiedlichen Umweltzustände bekannt sind. Bei **Ungewissheit**[19] (Engl.: ignorance) sind zwar die möglichen zukünftigen Umweltzustände bekannt, deren Eintrittswahrscheinlichkeiten jedoch nicht. STRAND & OUGHTON (2009, S. 20) ordnen außerdem die totale Ungewissheit der Unsicherheitssituation zu, in der weder Umweltzustände noch deren Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt sind.

[19] *Ungewissheit* und *Unsicherheit im engeren Sinne* werden in der Literatur synonym verwendet (siehe z. B. LAUX ET AL. 2003, S. 22).

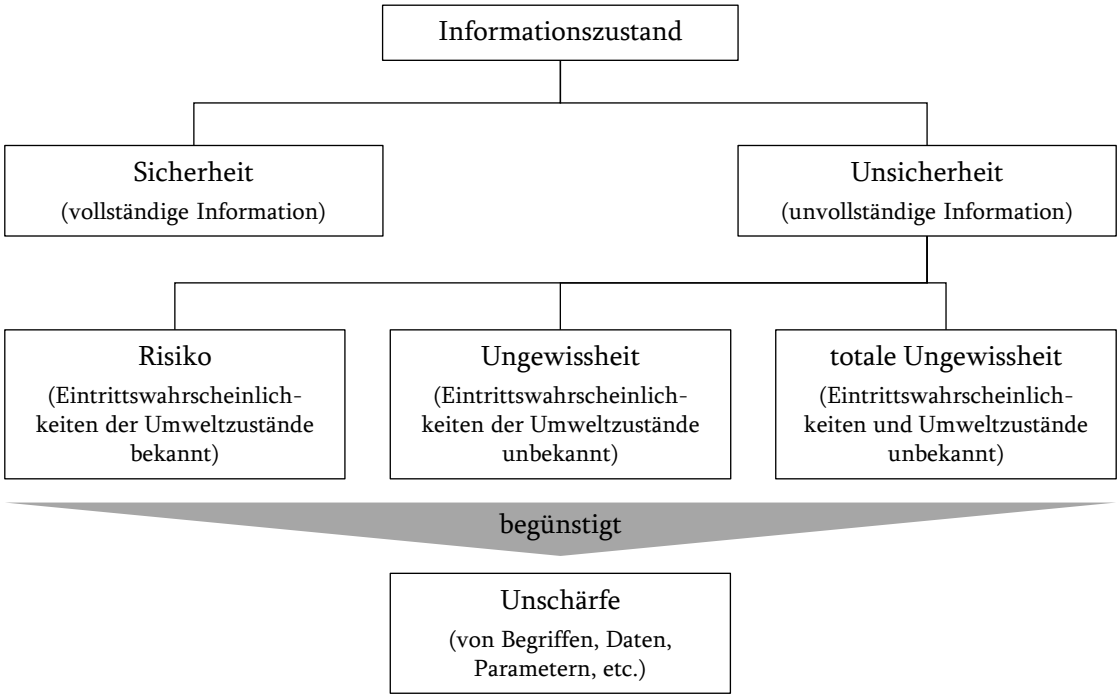


Abb. 2.3: Informationszustände in der Entscheidungstheorie und Einfluss auf die Unschärfe (i. A. a. SCHNEEWEIß 1991, S. 36 und BRUNNER 1994, S. 6–8).

Unschärfe kann aus einer unsicheren Situation hervorgehen und wird durch diese begünstigt. Ist beispielsweise der Eintritt des Ereignisses Finanzkrise im Jahr 2020 unsicher, kann dieses Ereignis zu unscharfen Absatzzahlen (Daten) von Unternehmen führen.

2.2 Modellierung und Klassifizierung von Unsicherheit und Unschärfe

Im Folgenden wird ein Überblick über Klassifizierungsansätze für Unsicherheit und Unschärfe gegeben, zudem werden relevante Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie, Intervallstatistik und Fuzzy-Set-Theorie erläutert.

2.2.1 Klassifizierungsansätze für Unsicherheit und Unschärfe

In der Literatur werden unterschiedliche Charakteristika zur Klassifizierung von Unschärfe herangezogen, die sich drei Meta-Charakteristika zuordnen lassen: Typ, Grad und Quelle von Unschärfe bzw. Unsicherheit.[20]

[20] Die Begriffe Unschärfe und Unsicherheit werden beide genannt, da je nach Quelle die Terminologie variiert. In diesem Kapitel wurde der ursprüngliche, in der jeweiligen Quelle verwendete Begriff beibehalten, auch wenn dieser nicht konform mit der Begriffsverwendung in dieser Arbeit ist. Die für diese Arbeit relevante Begriffsabgrenzung und -definition wird in Kap. 2.1.4 vollzogen.

Meta-Charakteristik 1: Typ der Unschärfe

Die Meta-Charakteristik *Typ* bezieht sich auf die Frage: Ist Unschärfe durch zusätzlichen Aufwand oder zusätzliche Kosten reduzierbar? Ist eine Reduzierung möglich (z. B. durch die nachträgliche Erhebung von Daten), wird die Unschärfe

- epistemische (HELTON & BURMASTER 1996, PATÉ-CORNELL 1996),
- subjektive (HELTON 1997),
- reduzierbare, Typ-B- (HELTON 2008) oder
- Typ-2-Unschärfe (STRAND & OUGHTON 2009)

genannt. Ist die Unschärfe nicht reduzierbar, sondern entsteht durch zufällige, dem zugrunde liegenden System inhärente Variation (OBERKAMPF ET AL. 2002), wird von

- aleatorischer (HELTON & BURMASTER 1996, PATÉ-CORNELL 1996),
- ontologischer (WALKER ET AL. 2003),
- ontischer (COLUBI & GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ 2015),
- stochastischer (HELTON 1997),
- nichtreduzierbarer, Typ-A-(HELTON 2008),
- Typ-1-Unschärfe (STRAND & OUGHTON 2009) oder auch
- Variabilität (HOFFMAN & HAMMONDS 1994)

gesprochen.

Meta-Charakteristik 2: Grad der Unschärfe

Der Grad der Unschärfe bezieht sich auf deren Quantifizierbarkeit. Im Hinblick auf eine vorhandene Datengrundlage unterscheidet HAMMOND (1978) sechs Unschärfegrade von „wissenschaftliches Laborexperiment, geeignet zur Entwicklung eines analytischen Modells“ hin zu „schwache, quasi-rationale oder intuitive Beurteilung“. Die Ausführungen von OXLEY & APSIMON (2011) bauen auf den Unschärfegraden auf und aggregieren diese in 4 Stufen: *empirische* (z. B. Daten aus Monitoringsystemen oder Messungen), *theoretische* (z. B. Daten aus mathematischen Modellen oder Simulationen), *virtuelle* (z. B. Daten aus Bewertungsmodellen) und *perzeptive* (z. B. Daten aus Szenariobildung) Unschärfe. Einfach anwendbar ist die Unterscheidung in *quantitative* bzw. *qualitative* Unschärfe (REINHART ET AL. 2009, KARWOWSKI & EVANS 1986), die von einer Reihe Autoren unter den Begriffen Wahrscheinlichkeitstheorie (i. S. der klassischen Statistik) und Möglichkeitstheorie (i. S.

der Fuzzy-Programmierung und -Optimierung) adressiert wird (KLIR 1987, PAL & BEZDEK 1994, LUHANDJULA 2006). WALKER ET AL. (2003) entwickeln ein Klassifizierungsschema für Unsicherheit, in dem vier Grade definiert werden: *Statistische* (alle zukünftigen Umweltzustände und ihre Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt), *Szenario-* (einige plausible zukünftige Umweltzustände bekannt, deren Wahrscheinlichkeiten unbekannt) und *qualitative* Unsicherheit (wenige zukünftige Umweltzustände ohne Eintrittswahrscheinlichkeiten bekannt) sowie *Ignoranz* (Bewusstsein über unbekannte zukünftige Umweltzustände vorhanden). REFSGAARD (2011) sowie STRAND & OUGHTON (2009, S. 20) fügen diesem Schema den o. g. Grad der *totalen Ignoranz* (kein Bewusstsein darüber, dass unbekannte zukünftige Umweltzustände vorliegen) hinzu. Die Ausführungen von HIRSHLEIFER & RILEY (1992, S. 10–11) beziehen sich auf Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Diese sind *hart* oder *objektiv*, wenn sie, beispielsweise durch Messungen oder auf Basis empirischer Daten, bestimmbar sind. *Weiche* oder *subjektive* Wahrscheinlichkeitsverteilungen hingegen werden in Ermangelung einer ausreichenden Datengrundlage von Experten auf Basis sachlogischer Überlegungen ermittelt oder geschätzt.

Meta-Charakteristik 3: Quellen der Unschärfe

Die dritte Meta-Charakteristik ist die *Quelle* der Unschärfe bzw. Unsicherheit, welche die Frage nach dem Ursprung oder der Entstehung derselben fokussiert. Da die Quelle stark kontextabhängig ist, wird im Folgenden nur auf einige relevante Unschärfequellen für den Bereich der Produktions- und Fabrikplanung eingegangen. SETHI & SETHI (1990) und HO (1989) unterscheiden *externe* und *interne* Quellen der Unsicherheit. Erstere beziehen sich auf externe Einflussfaktoren, die nicht durch das Unternehmen selbst beeinflusst werden können, wie beispielsweise Nachfrage, Variantenmix oder Liefertreue der Zulieferer. Interne Unschärfequellen bestehen im Unternehmen und können aktiv beeinflusst werden. Beispiele sind Instandhaltungs- und Wartezeiten, Nacharbeit, Qualitätsmängel oder auch Änderungen von Produkten oder Werkstoffen. GEBHARD (2009, S. 22-23) baut auf dieser Klassifizierung auf, untergliedert externe Quellen jedoch in *Unsicherheit bezüglich des Inputs eines Produktionsprozesses* (im Wesentlichen beeinflusst durch die Lieferanten) und dessen *Output* (im Wesentlichen beeinflusst durch die Kunden). Interne Quellen für Unsicherheit werden mit Bezug zum Produktionssystem analog zu SETHI & SETHI (1990) angeführt (z. B. Prozesszeiten, Qualität, Kapazität etc.).

SCHOPPE (1991, S. 18–28) und darauf aufbauend HÖNERLOH (1997, S. 30–38) differenzieren drei Gruppen von Unschärfequellen in der Betriebswirtschaft, die auf die Fabrikplanung übertragbar sind (HAWER ET AL. 2015): Die erste Gruppe adressiert die Entstehung von Unschärfe aufgrund der *Komplexität realer Systeme*, die *Grenzen der menschlichen Wahrnehmung* bzgl. zukünftiger Umweltzustände und die Schwierigkeit, *präzise Nutzenfunktionen und Anforderungen* zu formulieren. Ebenso gehören zufällige, unvorhersehbare Ereignisse, die zur sog. *stochastischen Unschärfe* bzw. Unsicherheit im Sinne dieser Arbeit führen, zur ersten Gruppe. Die zweite Gruppe bezieht sich auf Unschärfe, die aus der *Verwendung der natürlichen Sprache* zum Ausdruck gedanklicher Konstrukte (z. B. klein, mittel, groß) oder Relationen (z. B. viel größer als) resultiert. Weiterhin werden *Messmethoden und deren Ungenauigkeit*, hohe *Änderungsfrequenzen* bzw. *Volatilität* sowie *unterschiedliche Begriffsauffassungen,* z. B. durch räumliche und kulturelle Differenzen, der zweiten Gruppe zugeschrieben. Die Unschärfequellen der dritten Gruppe nach SCHOPPE (1991, S. 18-28) umfassen *Abstraktion* (Isolierung und Strukturierung relevanter Systemeigenschaften auf einem höheren Abstraktionsniveau zur Reduzierung von Komplexität) sowie *Transformation* (Überführung realer Prozesse in beispielsweise Simulationsmodelle) in der Modellbildung.

Um die in diesem Kapitel beschriebenen Unschärfen und Unsicherheiten mathematisch zu modellieren, kann auf unterschiedliche theoretische Ansätze zurückgegriffen werden, deren Grundlagen im Folgenden erläutert werden (Kap. 2.2.2 bis 2.2.3).

2.2.2 Relevante Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik

Die in diesem Kapitel dargelegten Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie bilden die Wissensbasis für die Modellierung von Unschärfe und Unsicherheit, basierend auf empirischen Daten.

Ein Zufallsexperiment (und damit auch seine *Zufallsvariable*[21]) ist „diskret, wenn sich seine Ergebnismenge (Menge von allen möglichen Elementarereignissen) abzählen lässt, […] [und (Ergänzung des Verfassers)] stetig, wenn diese Menge ein Intervall reeller Zahlen darstellt“ (ADAMEK 2016, S. 6). In Anlehnung an ADAMEK (2016, S. 6-7) wird die Anzahl aller Elementarereignisse (bei dem diskreten Zufallsexperiment „Wurf einer Münze“ sind dies

[21] Nach BEWERSDORFF (2003, S. 39–40) wird eine Zufallsvariable definiert als eine „Zuordnungsvorschrift, bei der jedem Ergebnis des Experiments eine Zahl zugeordnet wird.“

die beiden möglichen Seiten der Münze) Ergebnismenge *E* genannt, die Anzahl aller Zufallsvariablen *x* bildet die Grundgesamtheit *X*.

Die **Wahrscheinlichkeitsverteilung** (WKV) einer diskreten Zufallsvariablen entsteht aus der Wahrscheinlichkeit *P(x)*, aufgetragen über der Anzahl tatsächlicher Realisierungen der möglichen Elementarereignisse durch die Zufallsvariable *x* (WALDI 2015, S. 15-16). Eine solche WKV kann als Histogramm dargestellt werden (siehe Abb. 2.4, links).

Da eine stetige (kontinuierliche) Zufallsvariable ein Intervall reeller Zahlen darstellt, existieren zwischen jedem Intervall zweier Messpunkte unendlich viele mögliche Werte. Damit sind auch die Wahrscheinlichkeiten für jeden Einzelwert unendlich klein und können nicht, wie bei diskreten Zufallsvariablen, in einem Histogramm dargestellt werden. Für die Modellierung der Verteilung von Wahrscheinlichkeiten kontinuierlicher Variablen wird daher die **Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion** herangezogen (WALDI 2015, S. 15-16, ADAMEK 2016, S. 16) (siehe Abb. 2.4, rechts).[22] Das Äquivalent der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion bei diskreten Verteilungen ist die sog. Zähldichte (MEINTRUP & SCHÄFFLER 2005, S. 63-64).

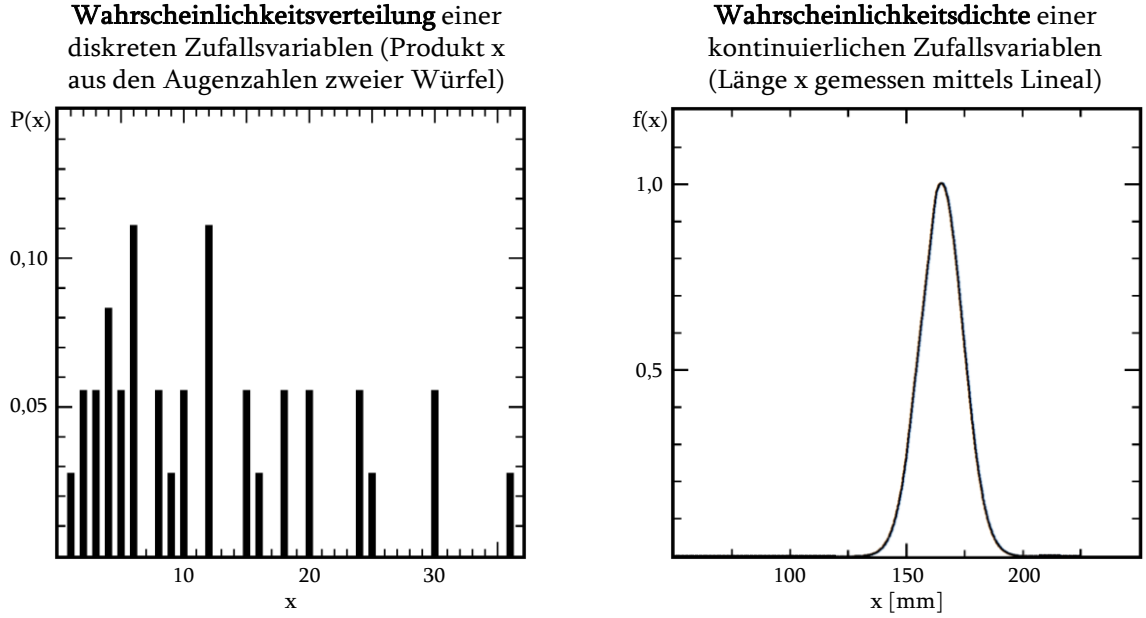


Abb. 2.4: Beispiele einer Wahrscheinlichkeitsverteilung und der Wahrscheinlichkeitsdichte (i. A. a. WALDI 2015, S. 15-16).

[22] In dieser Arbeit wird zur Benennung der Verteilungen von Wahrscheinlichkeiten sowohl diskreter als auch kontinuierlicher Zufallsvariablen der Term Wahrscheinlichkeitsverteilung i. S. eines Überbegriffs verwendet.

Sowohl für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen als auch für die -dichtefunktion existieren eine Reihe häufig verwendeter theoretischer Funktionen (MOSLER & SCHMID 2006, S. 75-115, WALDI 2015, S. 46-95). Zu den kontinuierlichen Verteilungen gehören beispielsweise (Log-)Normal-, Gleich- und Exponentialverteilung; zu den diskreten Binomial-, Poisson- und (hyper-)geometrische Verteilung. Die für diese Arbeit relevanten Funktionen sind in Anhang G und H zusammengefasst.

Verteilungen können anhand von Maßzahlen der zentralen Tendenz (Modus, Median, arithmetisches Mittel etc.) sowie Maßzahlen der Streuung (Varianz, Standardabweichung etc.) näher beschrieben werden (RÖßLER & UNGERER 2008, S. 34-55). Eine Übersicht dieser Maßzahlen sowie deren Berechnung und Beschreibung ist in Anhang I dargestellt.

Die erläuterten Grundlagen der Wahrscheinlichkeitstheorie finden Anwendung in der Statistik, die sich in zwei Teilbereiche, die **deskriptive** (auch: beschreibende, DÜMBGEN 2016, S. 15) und **induktive** (auch: schließende, DÜMBGEN 2016, S. 15, oder beurteilende, ADAMEK 2016, S. 133-134) **Statistik** untergliedern lässt (RÖßLER & UNGERER 2008, S. 57-76). In der deskriptiven Statistik wird das Ziel verfolgt, empirische Daten mithilfe von Wahrscheinlichkeitsverteilungen quantitativ zu beschreiben und diese grafisch darzustellen (DÜMBGEN 2016, S. 15). In der induktiven Statistik hingegen werden Stichproben verwendet, um Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit zu ziehen (WALDI 2015, S. 69-70): Beispielsweise werden Mittelwert und Standardabweichung der Stichprobe herangezogen, um mithilfe einer Parameterschätzung[23] die Parameter der zugrunde liegenden Verteilung zu ermitteln (ADAMEK 2016, S. 133-134). Die wichtigsten Verfahren der induktiven Statistik sind nach DÜMBGEN (2016, S. 15) Punktschätzung, Intervallschätzung (z. B. mittels Konfidenzintervallen) und statistische Tests (Hypothesen- bzw. Signifikanztests).

2.2.3 Grundlagen der Fuzzy-Set-Theorie

Aufbauend auf den Definitionen zur Unschärfe aus Kapitel 2.1.4 werden im Folgenden relevante Grundlagen der Fuzzy-Set-Theorie und der Fuzzy-Arithmetik erläutert. Diese sind relevant für die Modellierung von Unschärfen, die nicht mithilfe empirischer Daten quantifiziert und als Wahrscheinlichkeitsverteilung abgebildet werden können.

[23] Häufig verwendete Verfahren sind die Maximum-Likelihood-Methode und die Methode kleinster Quadrate (MOSLER & SCHMID 2006, S. 204, KRÖLL 2007, S. 104), siehe auch Kap. 5.3.1.

Sei X eine Grundmenge mit den Elementen x, also $X = \{x\}$. Dann wird nach ZADEH (1965) eine **unscharfe Menge** A in X charakterisiert durch ihre sog. Zugehörigkeitsfunktion $\mu_A(x)$.[24] Diese Funktion gibt den Grad der Zugehörigkeit von x zur Menge A im Intervall $[0,1]$ an, wobei gilt (BOTHE 1995, S. 25):

$$A = \{(x; \mu_A(x)) | x \in X, \mu_A(x) \in \mathbb{R}\} \tag{2.1}$$

$$\mu_A: X \to [0,1] \tag{2.2}$$

Dabei drückt der Funktionswert $\mu_A(x) = 1$ vollständige Zugehörigkeit des Elements x zur Menge A aus, der Wert 0 bedeutet keine Zugehörigkeit (ZADEH 1965). Dieser Sachverhalt wird anhand eines Beispiels in Abb. 2.5 visualisiert:

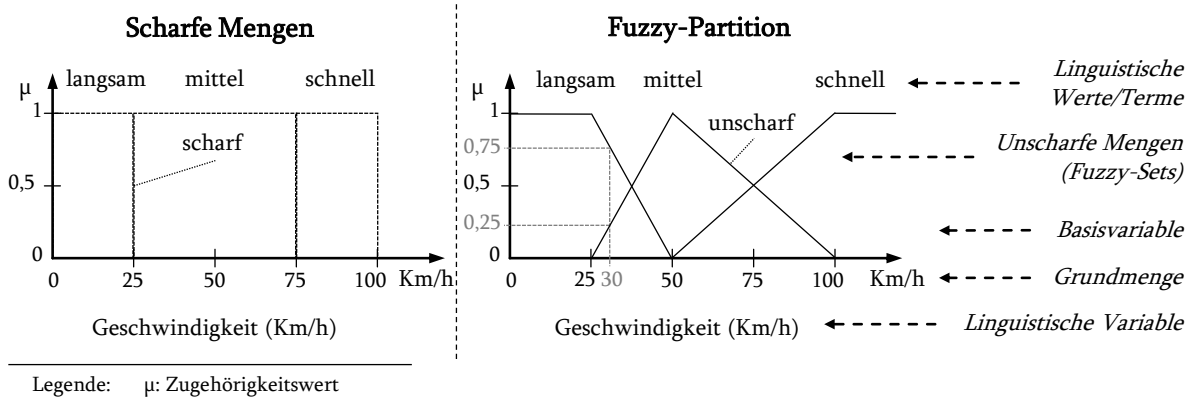


Abb. 2.5: Beispiel zu scharfen und unscharfen Mengen (i. A. a. SCHÖNMANN 2018, S. 67, ZIMMERMANN 2010, KRUSE ET AL. 1994, S. 2–3).

Das linke Diagramm zeigt die drei scharfen Mengen: niedrige Geschwindigkeit $L = [0,...,25[$, mittlere Geschwindigkeit $M = [25,...,75[$ und hohe Geschwindigkeit $H = [75,...,\infty[$ in km/h. Die Werte der einzelnen Mengen sind scharf voneinander getrennt, somit ist beispielsweise der Wert 30 km/h nur als mittlere Geschwindigkeit zu bezeichnen.

In der Realität können solche scharfen Trennungen jedoch oft nicht vollzogen werden oder deren Grenzwerte sind intersubjektiv unterschiedlich (KRUSE ET AL. 1994, S. 2–3). Diesem Sachverhalt trägt die Fuzzy-Set-Theorie Rechnung, wie im rechten Diagramm in Abb. 2.5 dargestellt: Die linguistische Variable Geschwindigkeit wird nach wie vor durch ihre Werte *langsam, mittel* und *schnell* charakterisiert. Diese werden jedoch durch unscharfe Mengen über der Grundmenge modelliert. Der Übergang von einem Wert zum nächsten kann somit

[24] Die ursprüngliche Notation in ZADEH (1965) weicht von der hier verwendeten Schreibweise ab, die sich an der aktuellen Literatur und den heute gebräuchlichen Konventionen orientiert (siehe z. B. DUBOIS & PRADE 2000, BOTHE 1995).

graduell erfolgen, 30 km/h kann beispielweise mit einem Zugehörigkeitswert von 0,75 dem linguistischen Wert *langsam* und gleichzeitig mit 0,25 dem Wert *mittel* zugeordnet werden. Mehrere unscharfe Mengen, die derselben Grundmenge zugeordnet werden, können zusammenfassend als Fuzzy-Partition bezeichnet werden (DUBOIS & PRADE 2000, S. 75–76). Es existieren zahlreiche unterschiedliche Formen von Zugehörigkeitsfunktionen; die Dreiecks- (Lambda-Typ), Trapez- (Pi-Typ) und die Rampenform (Z- oder S-Typ) werden in der Literatur häufig aufgeführt (NICOLAI 1995, S. 15, KAHLERT 1995, S. 15-16, HÖNERLOH 1997, S. 42-44). Die genannten Funktionen sind in Abb. 2.6 dargestellt.

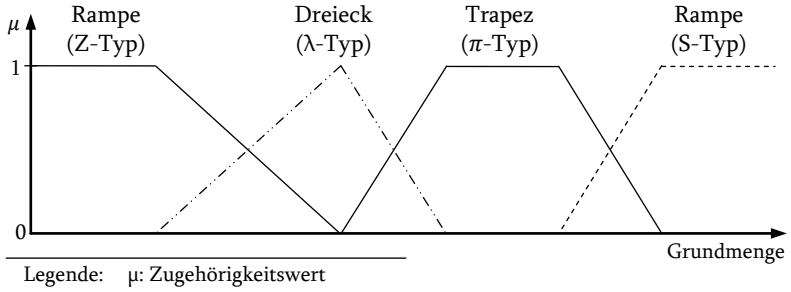


Abb. 2.6: Typische Formen von Zugehörigkeitsfunktionen unscharfer Mengen (i. A. a. NICOLAI 1995, S. 15).

2.3 Unschärfefortpflanzung in Systemen

Da im Fokus der zu entwickelnden Methode nicht nur einzelne, voneinander unabhängige Parameter des Fabrikplanungsprozesses, sondern deren Wirkungsgefüge und Interdependenzen stehen, sind auch deren Unschärfen durch Abhängigkeiten verknüpft. In solchen komplexen Systemen (siehe Kap. 2.4) führen Unschärfen der Eingangsparameter zu Unschärfen der Ausgangsparameter (CIROTH 2001, S. 3). Die Analyse der Auswirkung von Unschärfe bzw. Unsicherheit über mehrere, miteinander in Beziehung stehende Elemente hinweg wird in der Literatur als Fehler- (GRABE 2011, S. 75, CIROTH 2001, S. 3), Unsicherheits- (DIN 1319-4, JCGM 2008, CZICHOS ET AL. 2011, S. 72–76) oder Unschärfefortpflanzung[25] (KRUSE 1986, SCHNATTER 1991) beschrieben. CIROTH (2001, S. 4) differenziert zwischen analytischen und simulativen Verfahren zur Ermittlung der Unschärfe eines Ausgangsparameters auf Basis seiner Eingangsparameter.[26]

[25] In Anlehnung an SCHNATTER (1991) wird im Rahmen dieser Arbeit der Begriff Unschärfefortpflanzung für die Fortpflanzung von Datenunschärfe verwendet.

[26] Die Begriffe Eingangs- und Einflussparameter, Einflussfaktor und unabhängige Variable werden in dieser Arbeit, ebenso wie die Begriffe Ausgangs- und Ergebnisparameter sowie abhängige Variable, synonym verwendet.

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Unterscheidung gefolgt, jedoch die Fuzzylogik nicht als analytisches Verfahren, sondern als eigenständiger Ansatz aufgefasst.

2.3.1 Analytisches Verfahren

Als analytische Verfahren sind v. a. Ansätze der Fehler- bzw. Unsicherheitsrechnung für diese Arbeit relevant. Grundidee dabei ist, die Unschärfe eines abhängigen Parameters, der mittels einer Verknüpfungsfunktion aus mehreren Einflussparametern berechnet wird, zu bestimmen (PFEIFER & PROFOS 2008, S. 35). Dazu wird die Funktion in eine Taylorreihe entwickelt (GERTSBAKH 2003, S. 88-90): Sei y eine Zufallsvariable, die als Funktion mehrerer Einflussparameter $x_1, x_2, \ldots, x_n$ beschrieben werden kann.

$$y = f(x_1, x_2, \ldots, x_n) \tag{2.3}$$

Das arithmetische Mittel der Einflussparameter sei μ_i, ihre Standardabweichung σ_i. Um die gesuchte Varianz von y zu ermitteln, wird y in eine Taylorreihe in der Umgebung von μ_i entwickelt.

$$y = f(\mu_1, \mu_2, \ldots, \mu_n) + \sum_{i=1}^{n} \left.\frac{\partial f}{\partial x_i}\right|_{x_i=\mu_i} \cdot (x_i - \mu_i) + \cdots \tag{2.4}$$

In Formel (2.4) ist aus Gründen der Übersichtlichkeit nur der lineare Term der Taylorreihe dargestellt. Eine Vernachlässigung der Terme höherer Ordnung der Taylorreihe ist möglich, sofern die Fehler $x_i - \mu_i$ klein gegenüber den wahren Werten sind. GERTSBAKH (2003, S. 89) geben für diese Annahme einen Richtwert von

$$\frac{\sigma_i}{\mu_i} \leq 0{,}05 \tag{2.5}$$

an. Wird in Formel (2.4) bei Abbruch nach dem linearen Term (es entfällt das „+…“) die Varianz von beiden Seiten der Gleichung ermittelt, folgt

$$Var(y) \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot Var(x_i) \tag{2.6}$$

$$\Rightarrow \sigma_y \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \cdot \sigma_i^2} \tag{2.7}$$

Formel (2.7) ist das **Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz**[27] (KAMKE & KRÄMER 1977, S. 168, SCHENK ET AL. 2014B, S. 16-17). Aufgrund der durch die Taylorreihenentwicklung vorgenommenen Annährung an die reale Funktion durch eine Potenzreihe (STRAMPP 2015, S. 231) kann dieser Ansatz den analytischen Verfahren zugeordnet werden. Die Anwendung des Gauß'schen Unschärfefortpflanzungsgesetzes beruht auf den folgenden Voraussetzungen:

- Eine mathematische Verknüpfungsfunktion ist bekannt (GRABE 2011, S. 63).
- Die Standardabweichungen der Einflussvariablen x_i sind quantifizierbar oder schätzbar (GERTSBAKH 2003, S. 92).
- Die Fehler der Einflussvariablen sind klein gegenüber ihren wahren Werten (siehe Formel (2.5)) $\Longrightarrow$ Die Taylorreihe kann nach dem linearen Term abgebrochen werden (GERTSBAKH 2003, S. 89, GRABE 2011, S. 65).
- Die Einflussvariablen sind voneinander unabhängig (PFEIFER & PROFOS 2008, S. 35, DIN 1319-4, S. 13).
- Es handelt sich um zufällige Fehler bzw. Unschärfe, die als kontinuierliche Verteilung modelliert werden kann (HOFMANN 1983, S. 200, KAMKE & KRÄMER 1977, S. 164).

Sollten einzelne Annahmen nicht haltbar sein, ist eine Untersuchung der Unschärfefortpflanzung trotzdem möglich, dies muss jedoch bei der Wahl des entsprechenden Verfahrens berücksichtigt werden. Ist beispielsweise der Fehler größer als in Formel (2.5) empfohlen, ist eine Entwicklung der Taylorreihe bis zum zweiten Glied eine mögliche Lösung (CIROTH 2001, S. 6). Sind die Einflussvariablen korreliert, kann eine Verallgemeinerung des Unschärfefortpflanzungsgesetzes, das sog. Kovarianzfortpflanzungsgesetz, angewendet werden (PFEIFER & PROFOS 2008, S. 36). Zur Analyse der Fortpflanzung systematischer Fehler kommt das lineare Fehlerfortpflanzungsgesetz zum Einsatz (HOFMANN 1983, S. 189–190).

[27] Um die in Kap. 2.1.4 gegebenen Definitionen konsequent anzuwenden, wird im Folgenden der Begriff Unschärfefortpflanzungsgesetz verwendet. Der Sachverhalt, dass es sich strenggenommen beim Gauß'schen Verfahren nicht um Fehler, sondern um Unschärfen handelt, wird auch in der DIN 1319-4, S. 13 angemerkt.

2.3.2 Simulatives Verfahren

In der zweiten Gruppe, der simulativen Verfahren zur Unschärfefortpflanzung, ist als wichtigster Ansatz die **Monte-Carlo-Simulation** zu nennen. Diese Methode findet aufgrund ihrer Einfachheit und Transparenz (SHONKWILER & MENDIVIL 2009, S. vi) in vielen Bereichen wie z. B. BWL, Finanz-, Ingenieur- und Naturwissenschaften oder dem Risikomanagement, Anwendung (THOMOPOULOS 2013, S. 2, SHONKWILER & MENDIVIL 2009, S. v, GORROD 2004, S. 81). Die Monte-Carlo-Simulation ist von besonderem Nutzen, wenn das zu untersuchende System zu komplex ist, um analytische Verfahren anzuwenden oder Wahrscheinlichkeitsverteilungen und deren Parameter aufgrund einer unzureichenden Datengrundlage nicht quantitativ ermittelt werden können (THOMOPOULOS 2013, S. 1, ROMMELFANGER 2008, S. 39-41). Auch auf den Gebieten der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Produktionssystemen unter Unsicherheit (MÖLLER 2008, S. 138-139, REINHART ET AL. 2009, KREBS 2012, S. 120-122) sowie der Produktions- und Layoutplanung (BAKIR & BYRNE 1994, CREUTZNACHER ET AL. 2016, CHAN & MALMBORG 2010) wurde die Monte-Carlo-Simulation bereits erfolgreich eingesetzt. Das Vorgehen bei der Monte-Carlo-Simulation (Abb. 2.7, unterer Teil) lässt sich wie folgt beschreiben (i. A. a. WENGERT & SCHITTENHELM 2013, S. 114, THOMOPOULOS 2013, S. 1, MOOSA 2014, S. 164-165 und PLATON & CONSTANTINESCU 2014):

1. Entwicklung eines deterministischen Modells des zugrunde liegenden Systems in der Form $y = f(x_1, x_2, ..., x_n)$, wobei x_i die Eingangsparameter des Modells sind.
2. Ermittlung der WKV (quantitativ oder qualitativ) der Eingangsparameter.
3. Generierung von Zufallszahlen[28] für jeden Eingangsparameter entsprechend seiner WKV durch zufälliges Ziehen.
4. Berechnung der (des) Ausgangsparameter(s) auf Basis des deterministischen Modells; n-malige Wiederholung der Schritte 3 und 4 (Simulationsdurchläufe).
5. Visualisierung und Auswertung der Ergebnisgrößen (simulierte Verteilungen der Eingangs- und Ausgangsparameter).

[28] Da die generierten Zufallszahlen nicht auf einer empirischen Erhebung basieren, sondern durch die Simulation „künstlich" erzeugt wurden, werden diese auch Pseudo-Zufallszahlen genannt (KOHLAS 1972, S. 1, ROMMELFANGER 2008, S. 41, GORROD 2004, S. 80).

Im Gegensatz zur einmaligen Berechnung eines Ausgangsparameters durch ein deterministisches Modell (Abb. 2.7, oberer Teil) erfolgt die Berechnung bei der Monte-Carlo-Simulation somit n-malig mit jedem Simulationsdurchlauf (Abb. 2.7, unterer Teil). Zur Darstellung der durch die Simulation erzeugten WKV hat sich das Histogramm etabliert (SHONKWILER & MENDIVIL 2009, S. 6).

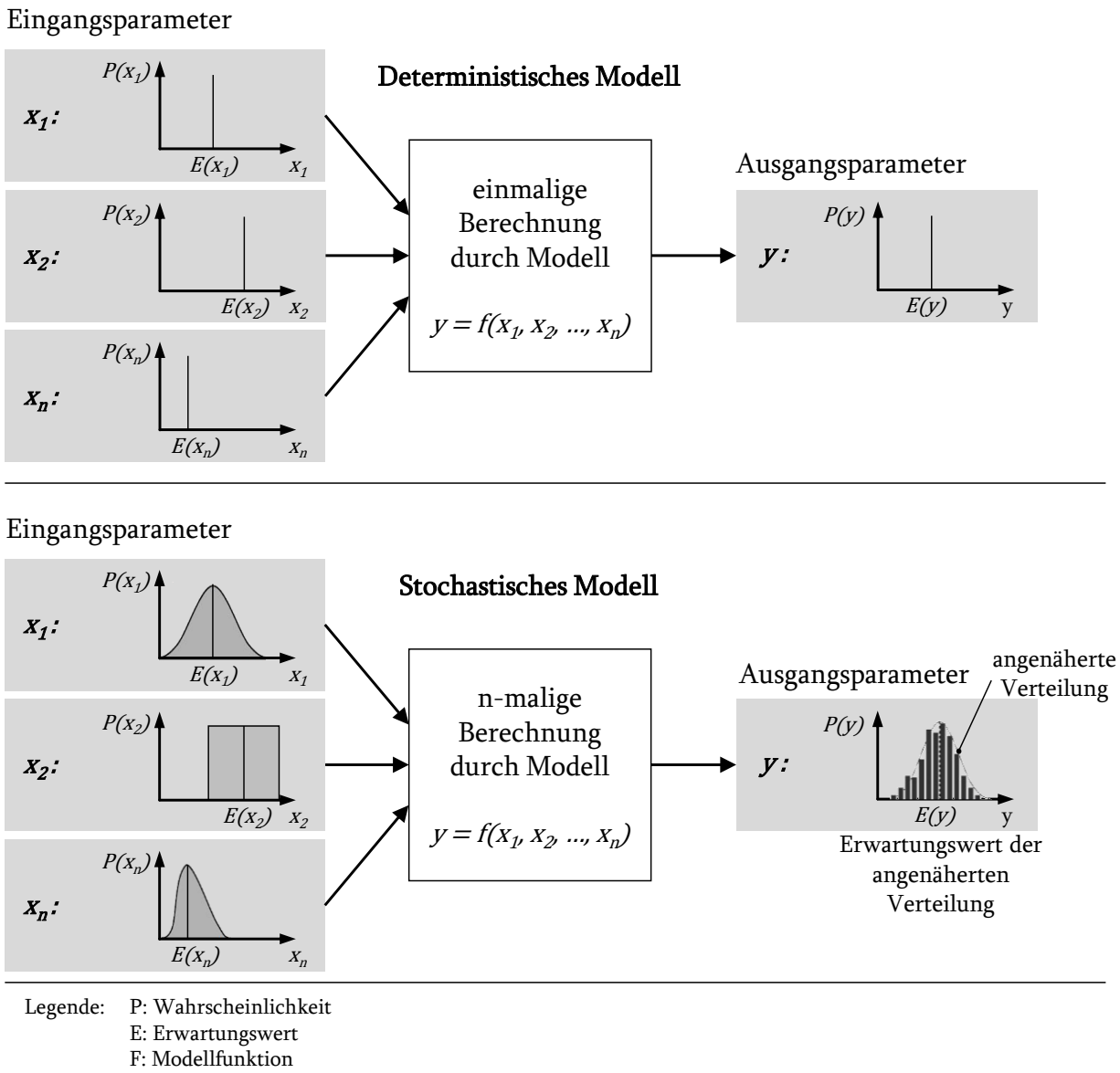


Abb. 2.7: Prinzip der Monte-Carlo-Simulation und Vergleich von deterministischem und stochastischem Modell (i. A. a. ROMMELFANGER 2008, S. 40, PLATON & CONSTANTINESCU 2014 und KREBS 2012, S. 32).

Die einzigen beiden Voraussetzungen, die zur Anwendung der Monte-Carlo-Simulation erfüllt sein müssen, sind:

- Die Verknüpfung[29] der Eingangs- und Ausgangsparameter ist durch ein Modell gegeben (ROMMELFANGER 2008, S. 39).
- WKV der Eingangsparameter sind, zumindest theoretisch, bekannt (ROMMELFANGER 2008, S. 41, GORROD 2004, S. 81).

Die Monte-Carlo-Simulation kann damit im Gegensatz zum Gauß'schen Unschärfefortpflanzungsgesetz auch zur Analyse der Fortpflanzung diskret verteilter Datenunschärfen angewendet werden.

2.3.3 Fuzzylogik

Die Fuzzy-Set-Theorie bietet die Möglichkeit, unscharfe linguistische Variablen oder unscharfe Zahlen zu modellieren. Die **Fuzzylogik**, in der ähnlich der Booleschen Logik die Verknüpfung von Termen durch Operatoren wie UND, ODER, NICHT oder WENN-DANN erfolgt (KAHLERT 1995, S. 20-23, DUBOIS & PRADE 2000, S. 125-193), ermöglicht, basierend auf den zuvor erläuterten unscharfen Mengen, die Modellierung unscharfer Abhängigkeiten zwischen unterschiedlichen Variablen bzw. Parametern (CIROTH 2001, S. 4, KREBS 2012, S. 44–45). Auf diese Weise kann die Fortpflanzung von Unschärfe in Planungsprozessen untersucht werden. Dabei werden Planungsprozesse als wissensbasierte Fuzzy-Systeme interpretiert, die dazu dienen, aus unterschiedlichen Eingangsparametern mithilfe eines fuzzy-regelbasierten Interpolationsverfahrens scharfe Ausgangsparameter zu bestimmen (KAHLERT 1995, S. 67, SCHÖNMANN 2018, S. 71). Die im Detail durchzuführenden Schritte sind im Folgenden erläutert:

Fuzzifizierung

Zunächst sind im Rahmen der *Fuzzifizierung* für die scharfen Eingangsparameter die jeweiligen Zugehörigkeitswerte zu den unscharfen Mengen (z. B. linguistische Variablen, unscharfe Zahlen) zu ermitteln. Es folgt eine Überprüfung, zu welchem Grad (Wahrheitswert) die durch unscharfe Mengen repräsentierten Werte (z. B. niedrig, mittel, hoch) erfüllt sind (BOTHE 1995, S. 10, KUHL 1996, S. 39).

[29] Es ist zulässig, diese Verknüpfungen als Korrelationen zwischen den Parametern anzugeben (MOOSA 2014, S. 173-174).

Inferenz

Ziel des *Inferenzvorgangs* ist die Bestimmung der Erfüllungsgrade (Zugehörigkeitswerte) der Ausgangsparameter zu deren unscharfen Mengen. Dazu werden drei Schritte sukzessive durchgeführt (HÖNERLOH 1997, S. 78-81):

Aggregation: Bestimmung des Erfüllungsgrades aller WENN-Teile (Prämisse oder Bedingung) der Fuzzy-Implikationen[30] (KAHLERT 1995, S. 28). Bei mehreren Eingangsparametern werden die Bedingungen der Implikationen auf Basis des vorliegenden Regelsystems, z. B. durch Operatoren wie UND/ODER, miteinander verknüpft. Als Ergebnis liegen somit die Erfüllungsgrade aller Prämissen vor (HÖNERLOH 1997, S. 79). Zur Aggregation können eine Reihe unterschiedlicher Operatoren angewendet werden. ZIMMERMANN (2001, S. 39–40) gibt eine Übersicht und Klassifizierung in Vereinigungs- (T-Normen), durchschnittsbildende (z. B. arithmetisches Mittel) sowie Schnittmengen-Operatoren (T-Konormen)[31], in der acht Auswahlkriterien für Aggregations-Operatoren aufgeführt werden (ZIMMERMANN 2001, S. 43–44).

Regelauswertung: Ziel der Regelauswertung ist die Ermittlung der Erfüllungsgrade der Konklusionen (DANN-Teile) der Regeln (HÖNERLOH 1997, S. 79). KAHLERT (1995, S. 39) leitet für den allgemeinen Fall einer Fuzzy-Implikation mit mehreren Teilbedingungen unter Verwendung des Kreuzproduktes der unscharfen Mengen der Bedingungen und Konklusionen her, dass die Zugehörigkeitswerte der Ausgangsgrößen mittels Minimum-Operator bestimmt werden können.

Akkumulation: Bei der Akkumulation werden die Einzelergebnisse der Regeln in der unscharfen Menge, die den Ausgangsparameter darstellt, zusammengeführt (SCHÖNMANN 2018, S. 72). Üblicherweise wird in diesem Schritt der Maximum-Operator verwendet (HÖNERLOH 1997, S. 80).

Defuzzifizierung

Ziel der *Defuzzifizierung* ist es, aus der unscharfen Ergebnismenge des Fuzzy-Inferenzvorgangs einen scharfen Ausgangsparameter abzuleiten. Dieser Schritt ist bei der Anwendung

[30] In Anlehnung an die Implikation in der Booleschen Logik wird eine WENN-DANN-Regel in der Fuzzylogik Fuzzy-Implikation genannt (KAHLERT 1995, S. 28).
[31] In der Literatur wird anstelle des Begriffes T-Konorm auch S-Norm für die Klasse der Vereinigungsoperatoren in der Fuzzylogik verwendet (siehe z. B. KAHLERT 1995, S. 20).

von Fuzzy-Reglern nötig, um einen scharfen Stellwert als Ausgangsgröße zu erhalten. Dabei können unterschiedliche Defuzzifizierungsverfahren zum Einsatz kommen (ZIMMERMANN 2001, S. 232-239). Häufig verwendet wird die Flächenschwerpunktmethode, die den Abszissenwert des Flächenschwerpunktes als Ergebnis heranzieht (BOTHE 1995, S. 12–13).

2.4 Grundlagen des strukturellen Komplexitätsmanagements

„Die Denkmuster komplexer Systeme implizieren eine Reihe interessanter Merkmale für die Fabrikplanungsmethode“ (SCHUH ET AL. 2006). Aus diesem Grund kommen Werkzeuge des strukturellen Komplexitätsmanagements in der vorliegenden Arbeit zum Einsatz, um Wirkzusammenhänge sowohl im Fabrikplanungsprozess als auch zwischen Veränderungsbefähigern zu analysieren. Als für diese Arbeit relevantestes Werkzeug werden im Folgenden die sog. Design-Struktur-Matrix und die mithilfe dieser ermittelbaren Kennzahlen eines Systems erläutert.

Eine **Design-Struktur-Matrix** (DSM) stellt eine einfache, flexible und oft angewandte Methode zur Modellierung von Wirkungsnetzen dar (EPPINGER & BROWNING 2012, S. xi). Die DSM ist eine quadratische $N x N$ Matrix, wobei N die Anzahl der Elemente des zugrundeliegenden Systems ist. In der Matrix werden die Wirkzusammenhänge zwischen den Elementen in gewichteter oder ungewichteter Form aufgeführt (EPPINGER & BROWNING 2012, S. 4–5). Im Rahmen dieser Arbeit wird zunächst die sog. Prozess-Architektur-DSM (EPPINGER & BROWNING 2012, S. 130) angewendet, um den Fabrikplanungsprozess auf Basis seiner einzelnen Schritte mit ihren jeweiligen Input- und Output-Parametern zu untersuchen. Zur Analyse der Wirkzusammenhänge von Veränderungsbefähigern kommt die sog. Produkt-Architektur-DSM (EPPINGER & BROWNING 2012, S. 18) zum Einsatz, da nach HILDEBRAND ET AL. (2004) und CONSTANTINESCU & WESTKÄMPER (2010) eine Fabrik mit ihren Elementen (hier VBF) auch als Produkt angesehen werden kann. An dieser Stelle sei angemerkt, dass als alternative Darstellungsform zur DSM dieselben Informationen über ein System, dessen Elemente und die zwischen diesen bestehenden Beziehungen auch in einem Graphen abgebildet werden können (MAURER 2007, S. 53). Zur Veranschaulichung dieses Sachverhalts ist der in Abb. 2.8 dargestellte gerichtete Graph in Abb. 2.9 in eine DSM überführt worden.

Das Element A beeinflusst beispielsweise das Element C mit der Stärke 2 (Abb. 2.8). Diese Beziehung ist ebenfalls in der ersten Zeile der DSM in Abb. 2.9 aufgeführt.

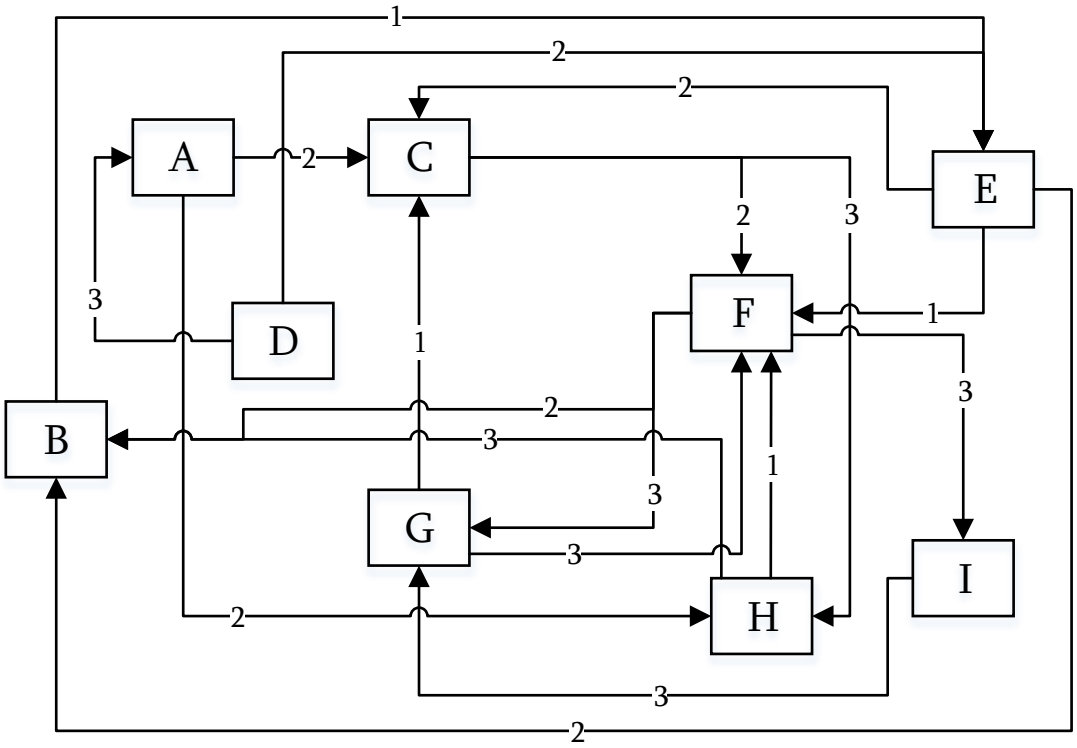


Abb. 2.8: Beispiel eines gerichteten Graphen zur Systemrepräsentation.

Design-Struktur-Matrix

Die Beziehungen werden wie folgt gelesen: Zeile beeinflusst Spalte, z.B. Element D beeinflusst Element A mit der Gewichtung 3.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Aktiv-summe
A			2					2		4
B					1					1
C						2		3		5
D	3				2					5
E		2	2			1				5
F		2					3		3	8
G			1			3				4
H		3				1				4
I							3			3
Passivsumme	3	7	5	0	3	7	6	5	3	

Abb. 2.9: Beispiel einer Design-Struktur-Matrix (i. A. a. EPPINGER & BROWNING 2012, S. 5).

Für die in Abb. 2.9 beispielhaft dargestellte DSM sind in der letzten Spalte bzw. Zeile die Aktivsumme bzw. Passivsumme des jeweiligen Elements aufgeführt, die nach LINDEMANN ET AL. (2009, S. 129) wie folgt definiert sind: Die **Aktivsumme** AS_i eines Systemelements i ist die Summe aller von diesem ausgehenden Wirkbeziehungen, also die Anzahl anderer Elemente, die von dem Element i beeinflusst werden. Die Aktivsumme wird ermittelt, indem die Summe aller Matrixeinträge in einer Zeile des jeweiligen Elements gebildet wird. Die **Passivsumme** PS_i eines Systemelementes i ist die Summe aller anderen Elemente, die

das Systemelement *i* über eine Wirkbeziehung beeinflussen. Sie wird ermittelt, indem die Summe aller Matrixeinträge in einer Spalte des jeweiligen Elements gebildet wird (siehe Abb. 2.9).

3 Stand der Forschung

In diesem Kapitel wird ein Überblick über den für diese Arbeit relevanten Stand der Forschung gegeben. Zunächst werden der Prozess der Fabrikplanung und seine jeweiligen Ausprägungsformen (Kap. 3.1) zusammenfassend dargestellt. Bestehende Modelle und Methoden zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen (Kap. 3.2) und deren Bewertung (Kap. 3.3) werden anschließend vorgestellt und analysiert. Zur Bildung eines einheitlichen Begriffsverständnisses wird in Kap. 3.4 eine Ontologie der Veränderungsfähigkeit präsentiert. Der Stand der Forschung wird mit einer Zusammenfassung der Defizite der existierenden Ansätze zur Planung und Bewertung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen (Kap. 3.5) abgeschlossen.

3.1 Prozess der Fabrikplanung

Im Folgenden werden klassische phasenbasierte von modularen Prozessmodellen zur Fabrikplanung unterschieden.

3.1.1 Klassische Prozessmodelle der Fabrikplanung

Die vielen existierenden Modelle klassischer Fabrikplanungsverfahren sind durch einen sequenziellen, in aufeinander aufbauenden Phasen gegliederten Planungsprozess charakterisiert. In der Literatur werden teilweise unterschiedliche Bezeichnungen verwendet, Phasenanzahl und -detaillierung variieren (KOCH ET AL. 2016, GRUNDIG 2009, S. 37). Die im Folgenden beschriebenen Prozessmodelle sind vergleichend in Abb. 3.1 dargestellt.

Das Prozessmodell nach REFA (1985) umfasst fünf Phasen und bildet die Grundlage für das siebenphasige Planungsvorgehen nach VDI 5200 als auch für das Phasenmodell nach GRUNDIG (2009, S. 37-38). Bei diesen Ansätzen kann die Bearbeitung einer Phase erst begonnen werden, sobald die vorherige Phase abgeschlossen ist. Das 10-Phasen-Modell von FELIX (1998, S. 87-110) sieht, ähnlich wie bei BERGHOLZ (2006, S. 150-152), teilweise zeitlich überlappende Phasen vor.

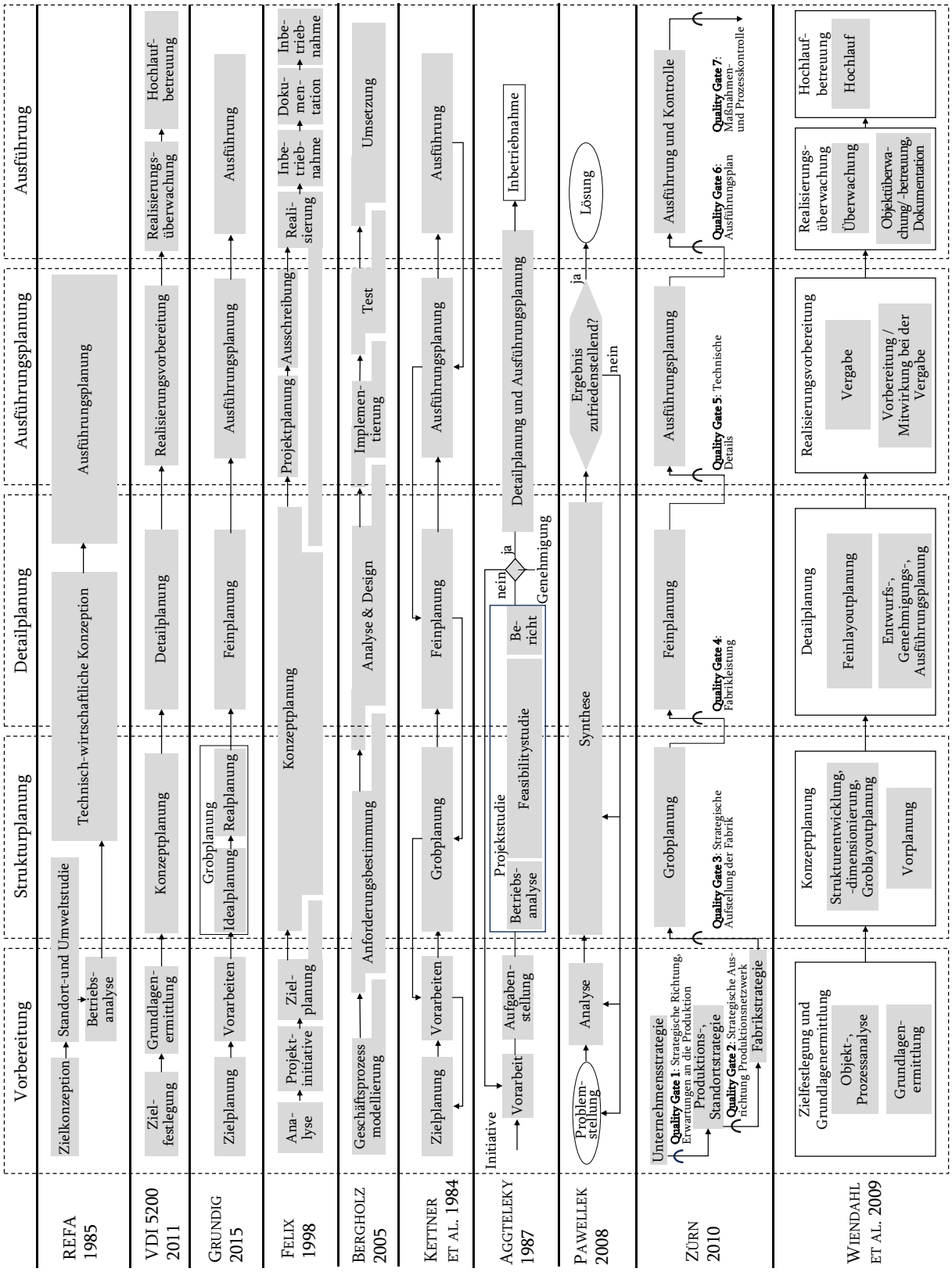


Abb. 3.1: Klassische Fabrikplanungsprozesse im Vergleich (i. A. a. GRUNDIG 2009, S. 38).

Der Fokus der Ausführungen von BERGHOLZ (2006, S. 150-152) liegt auf der Integration generischer Planungsphasen auf Basis von Interaktionen zwischen den Planungsschritten mit dem Ziel der Synchronisation einzelner Teilaktivitäten. Die ersten Autoren, die Iterationen in ihren Prozessmodellen vorsehen, sind KETTNER ET AL. (1984, S. 5). Dieser Ansatz umfasst Iterationen zum jeweils vorausgehenden Planungsschritt und lässt so Wiederholungen bestimmter Aktivitäten zur Verbesserung von Ergebnissen oder bei geänderter Prämissenlage zu. AGGTELEKY (1987, S. 37) erweitert die Iterationen um mehrere Schritte, ausgehend von einer Verzweigung, die den Genehmigungsvorgang im Anschluss an die Projektstudie darstellt.

PAWELLEK (2008, S. 37-39) entwickelt ein Vorgehensmodell zur ganzheitlichen Fabrikplanung, in dem alle Komponenten, die zur Gestaltung der Fabrik erforderlich sind sowie deren Wechselwirkungen, berücksichtigt werden sollen. Dazu kommt ein adaptierter Problemlösungszyklus als Grundlage des Planungsprozesses zum Einsatz, der Iterationen zur Überprüfung der Qualität einzelner Planungsergebnisse enthält.

Anstelle von Iterationen führt ZÜRN (2010, S. 50-55) einen Stage-Gate-Prozess[32] ein, der mithilfe sog. Quality Gates eine ausreichende Qualität der Ergebnisse zwischen den jeweiligen Planungsphasen sicherstellt. Ein Ansatz zur Förderung der Interaktion und Kooperation zwischen Produktions- und Gebäudeplanung bildet das Prozessmodell der synergetischen Fabrikplanung nach WIENDAHL ET AL. (2009, S. 453-458).

Trotz der Unterschiedlichkeit der klassischen Fabrikplanungsmodelle folgen alle den fünf Planungsgrundsätzen nach SCHMIGALLA (1995, S. 89):

- „vom Allgemeinen zum Einzelnen“,
- „vom Aggregierten zum Detaillierten“,
- „vom Globalen zum Konkreten“,
- „vom Typischen zum Individuellen“ und
- „vom Groben zum Feinen“.

Zwei wesentliche Aspekte finden in den vorgestellten klassischen phasenorientierten Fabrikplanungsmodellen jedoch keine Berücksichtigung: Die Planung einer Fabrik erfolgt

[32] Der von COOPER (2010, S. 125-176) entwickelte Stage-Gate-Prozess ist eine Methode, die in Entwicklungsprojekten die Qualität der einzelnen Projektschritte zu vorbestimmten Meilensteinen (sog. Toren oder Gates) durch die Überprüfung spezifischer Kriterien sicherstellt. Erst wenn eine positive Überprüfung erfolgt ist, kann der folgende Schritt von dem Projektteam begonnen werden.

stets fallspezifisch (WIENDAHL ET AL. 2015, S. 447), der Planungsprozess kann demnach von Unternehmen zu Unternehmen unterschiedlich gestaltet sein. Adaptionsmöglichkeiten sind in den klassischen Modellen kaum vorgesehen. Dieses Defizit wird durch einige modulare Prozessmodelle der Fabrikplanung adressiert. Des Weiteren wird in der Literatur gefordert, dass sich die Fabrikplanung aufgrund stetiger Veränderung des Unternehmensumfeldes (SPATH ET AL. 2001, S. 235), kürzer werdender Produkt- (BRINKMANN 1989, S. 1, ABELE ET AL. 2006) und Fabriklebenszyklen (HIRSCH ET AL. 2013, S. 850, NYHUIS ET AL. 2004, S. 95) sowie einer steigenden Variantenvielfalt (ZÄH ET AL. 2009) zu einem kontinuierlichen, produktionsbegleitenden Prozess weiterentwickeln muss (NYHUIS ET AL. 2004, S. 95, KOCH ET AL. 2013, WIENDAHL ET AL. 2007). Diese Forderung wird von kontinuierlichen Prozessmodellen der Fabrikplanung erfüllt.

Aufgrund der genannten Defizite klassischer Verfahren werden im Folgenden relevante existierende modulare und kontinuierliche Planungsprozessmodelle vorgestellt.

3.1.2 Modulare und kontinuierliche Prozessmodelle der Fabrikplanung

NOFEN (2006) verwendet das Konzept der Regelkreise zur Planung wandlungsfähiger und modularer Fabrikstrukturen. Dabei wird die Fabrik als Regelstrecke modelliert, das Produktionscontrolling als Messglied. Ein sog. Wandlungsmonitor, der Impulse aus dem turbulenten Unternehmensumfeld und dem Management aufnimmt und verarbeitet, wirkt als Regler. Dieser sendet Informationen (Stellgrößen) an die Fabrikplanung, die als Stellglied des Regelkreises fungiert und durch ihre Planung die Fabrik (Regelstrecke) beeinflusst und verändert, womit sich der Regelkreis schließt.

Dieses iterative Konzept der Fabrikplanung wird von AZAB ET AL. (2013) adaptiert, sodass der Bedarf nach Flexibilität, Wandlungs- und Veränderungsfähigkeit in drei Stufen abgefragt und in die Planung einbezogen wird. Detaillierte Handlungsanweisungen, wie diese Schritte durchzuführen sind, werden jedoch nicht gegeben. Auch TOMPKINS (2010, S. 6-9) stellt einen iterativen Planungszyklus vor, dessen Ziel die kontinuierliche Verbesserung der Fabrik ist.

Eines der ersten modularen Prozessmodelle für die Fabrikplanung wurde von KOHLER (2007, S. 63-64) entwickelt und beinhaltet Softwaremodule, die eine kontinuierliche und kostenorientierte Planung ermöglichen sollen. Jedes Softwaremodul unterstützt bestimmte

Planungsaktivitäten wie beispielsweise Materialflussplanung, Dimensionierung und Layoutplanung. Diese Module, die zusammengefasst den Fabrikplanungsprozess widerspiegeln, werden aus einem Grunddatenmodul gespeist und sind über eine zentrale Datenbank mit dem Bewertungs- und Analysemodul verbunden.

Die Internationale Organisation für Facility Management IFMA (2009) stellt ein modulares Prozessmodel bereit, um die eher strategischen Aktivitäten der Fabrik- und Masterplanung und die überwiegend taktischen Aufgaben der Produktionsplanung zu integrieren. Zu diesem Zweck kommt ein an den Prozess der Fabrikplanung angepasster PDCA-Zyklus[33] zum Einsatz. Die in Modulen separierten Planungsaktivitäten werden jeweils einer Hierarchieebene des Unternehmens zugeordnet, wobei Geschäftsleitung, Werkleitung und Mitarbeiter unterschieden werden.

Ein Ansatz, um verschiedene Modelle und Werkzeuge der Fabrikplanung in einer ganzheitlichen Methode zu kombinieren, wird von CONSTANTINESCU & WESTKÄMPER (2010) vorgeschlagen. Die Methode basiert auf der Verwendung von Fabrik- und Planungsdaten, die in den vier Planungsphasen strategische Planung, Strukturplanung, Prozessplanung und Fabrikbetrieb verarbeitet bzw. erhoben werden. Wirkzusammenhänge zwischen einzelnen Planungsparametern werden jedoch nicht berücksichtigt.

SCHUH ET AL. (2011) entwickeln ein modulares Prozessmodell, das auf Planungsparametern und deren Wirkzusammenhängen basiert und als Condition Based Factory Planning bezeichnet wird. Dabei wird jede Planungsaktivität in einem Modul abgebildet, das bestimmte Eingangsparameter benötigt, diese verarbeitet, und in dem als Ergebnis eine Reihe von Ausgangsparametern ermittelt wirderden. Diese können wiederum als Eingangsparameter für den folgenden Planungsschritt verwendet werden (Abb. 3.2).

Die Grundidee des Condition Based Factory Planning bietet die Möglichkeit, den Fabrikplanungsprozess auf Basis der tatsächlich relevanten Parameter zu modellieren. Der modulare Aufbau fördert die Adaptierbarkeit an unternehmensspezifische Fabrikplanungsprozesse und bietet somit die Grundlage für die Ausführungen in Kap. 5.2.

[33] Der PDCA (Plan-Do-Check-Act)-Zyklus ist ein iterativer Prozess zur kontinuierlichen Verbesserung nach einem regelkreisbasierten Vorgehen. Der PDCA-Zyklus kann den Problemlösungsmethoden zugeordnet werden (SYSKA 2006, S. 100-101).

Über die in diesem Kapitel erläuterten und für die vorliegende Arbeit besonders relevanten Prozessmodelle der Fabrikplanung hinaus existieren weitere Ansätze. Ein zusammenfassender Überblick kann KOCH ET AL. (2016) entnommen werden.

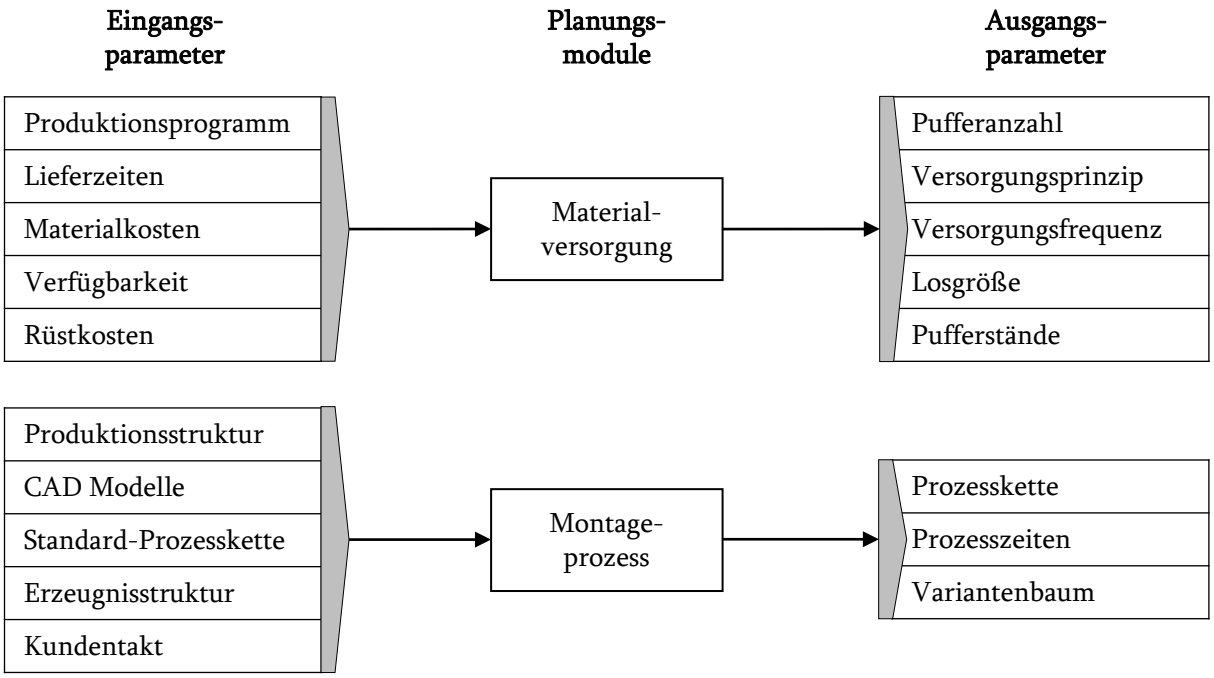


Abb. 3.2: Beispielhafte Planungsmodule mit Ein- und Ausgangsparametern (i. A. a. SCHUH ET AL. 2011).

3.2 Methoden zur Planung veränderungsfähiger Fabriken

Die in Kap. 3.1. vorgestellten Prozessmodelle bilden allgemeine Leitfäden für die im Rahmen eines Fabrikplanungsprojekts durchzuführenden Schritte. Diese beinhalten jedoch mehrheitlich keine konkreteren Handlungsanweisungen zur Planung der Veränderungsfähigkeit einer Fabrik. Dieser Aspekt wird im vorliegenden Kap. 3.2 anhand einer Literaturanalyse erörtert und es werden die für diese Arbeit relevantesten Ansätze vorgestellt.

3.2.1 Systematik der Wandlungsfähigkeit nach HERNÁNDEZ MORALES (2003)

Die Arbeit von HERNÁNDEZ MORALES (2003) kann als erster großer Meilenstein in der Erforschung und dem Einsatz von Wandlungsfähigkeit auf dem Gebiet der Fabrikplanung angesehen werden (OSTERMEIER 2015, S. 54). Kern der Arbeit ist die Anwendung systemtheoretischer Modellierungsansätze zur Repräsentation von Fabrikobjekten und deren Wandlungsbefähigern. Durch die Gegenüberstellung von Objekten unterschiedlicher Fabrikebenen und den sechs definierten Befähigern (siehe Kap. 2.1.3) werden wandlungsfördernde

Gestaltungsanforderungen abgeleitet (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 71-83). Die Methode von HERNÁNDEZ MORALES (2003) sieht die Identifikation von Wandlungsbedarfen durch die Anwendung des Szenario-Managements vor, das in mehreren Schritten abläuft (Abb. 3.3). Im ersten Schritt werden Einflussfaktoren der Szenarien aufgenommen und bedeutende Schlüsselfaktoren extrahiert. Für diese werden Zukunftsprojektionen in einem sog. Zukunftsraum erstellt und anschließend zu plausiblen Szenarien gebündelt. Die Auswirkungen dieser Szenarien werden für unterschiedliche Fabrikebenen analysiert. Im Rahmen des Schrittes Szenariotransfer wird ausgehend von den erstellten Szenarien die notwendige Wandlungsfähigkeit in Form von Wandlungstiefe und Wandlungsbreite abgeleitet (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 122-125). Die Wandlungsbreite bezieht sich auf die Anzahl der zu verändernden Fabrikobjekte, während die Wandlungstiefe die Differenz zwischen aktuell vorhandener und notwendiger Wandlungsfähigkeit eines Objektes kennzeichnet. Beide Größen werden zur Identifikation unkritischer, kritischer und sensitiver Wandlungsobjekte herangezogen (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 124-125) und auf dieser Basis Planungsstrategien abgeleitet. Dabei wird zwischen fokussierter (Planung basiert auf einem Szenario) und robuster Planung (Planung basiert auf mehreren Szenarien) unterschieden.

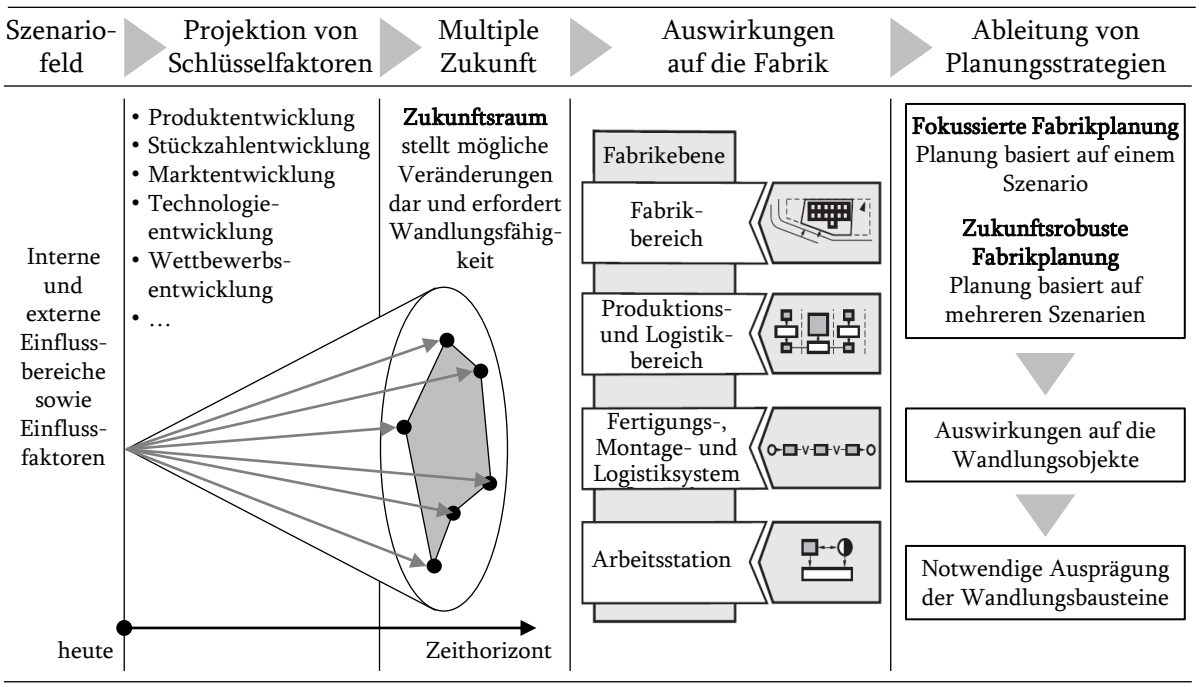


Abb. 3.3: Einsatz des Szenario-Managements in der Fabrikplanung nach HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 107).

Die Methode von HERNÁNDEZ MORALES (2003) erreicht durch den gezielten Einsatz von Wandlungsbefähigern eine Konkretisierung des Terms Veränderungsfähigkeit. Wirkbezie-

hungen zwischen den genannten Befähigern sowie den wandlungsfördernden Gestaltungsanforderungen werden jedoch nicht berücksichtigt. Außerdem ist nicht weiter detailliert, wie der aktuell vorhandene Grad der Veränderungsfähigkeit einer Fabrik ermittelt wird.

3.2.2 Planungsmethode für Rekonfigurationsprozesse nach CISEK (2005)

CISEK (2005) stellt eine Methode zur Planung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen vor, die sich auf die Fabrikstruktur- und Arbeitsstationsebene bezieht. Diese basiert auf drei Modulen, die kontinuierlich durchlaufen werden (CISEK 2005, S. 55-58): Das Monitoringmodul verarbeitet Produktionsdaten zur kennzahlenbasierten Überwachung der Produktionsstruktur, Analyse vorhandener produktmix- und absatzbezogener Trends und Identifikation von Rekonfigurationsbedarfen. Diese Bedarfe werden an das Planungsmodul weitergegeben, welches eine Optimierung der Produktionsstrukturen auf Basis der neuen Anforderungen vornimmt und die Überführung der Ist-Struktur in die Soll-Struktur unterstützt. Dazu wird die optimale Betriebsmittelanordnung mithilfe eines Algorithmus mit dem Ziel minimaler Materialflusskosten ermittelt und es werden alternative Layoutvarianten unter Zuhilfenahme von Ablaufsimulationen generiert. Modul 3 umfasst die Bewertung der Strukturalternativen durch „kapazitätsorientierte Kostenrechnung“ (CISEK 2005, S. 45-46).

Die entwickelte Methode stellt aufgrund der teilautomatisierten Abläufe ein effizientes Werkzeug für Umplanungen (auch wenn diese von kleinerem Umfang sind) dar. Die Automatisierung durch Algorithmen und Simulation beschränkt jedoch die aktiven Partizipationsmöglichkeiten der Planungsbeteiligten und senkt die Transparenz. Über die Unschärfe von Produktmix und Absatzmenge hinaus werden keine weiteren unscharfen Planungsparameter berücksichtigt.

3.2.3 Methode zur partizipativen Fabrikplanung nach GÜNTHER (2005)

GÜNTHER (2005) entwickelt in seiner Ausarbeitung ein praxisorientiertes Werkzeug zur Planung von wandlungsfähigen Fabrikstrukturen und -layouts mit einem Fokus auf Partizipation zwischen den Planungsbeteiligten. Aufbauend auf einer Literaturrecherche zu bestehenden Werkzeugen (z. B. CAD-, VR-Systeme, Zeichnungen, Simulationen), wird zunächst ein Verfahren zur Parallelisierung und Integration von Planungsprozessen konzipiert, das auf der Methode des Simultaneous Engineering basiert (GÜNTHER 2005, S. 50-67).

Zur Umsetzung der Zielsetzung wird die Software visTABLE® entwickelt, um rechnergestützte Gruppenarbeit in der Struktur- und Layoutplanung zu ermöglichen und eine Reihe von Analyse- und Visualisierungsfunktionen (z. B. Materialflussanalyse, 3-D-Darstellungen) bereitzustellen. Hilfsmittel zur expliziten Planung der Wandlungsfähigkeit werden jedoch nicht bereitgestellt, auch auf unscharfe Planungsdaten (z. B. Materialflüsse) wird nicht eingegangen. Die Arbeit basiert auf der Annahme, dass für die Planung wandlungsfähiger Strukturen eine ausgeprägte hierarchie- sowie funktionsübergreifende Kommunikation und Kooperation bei der Ausführung der Planungstätigkeit essenziell sind, die jedoch in den vorher existierenden Werkzeugen nicht ausreichend berücksichtigt wurden.

3.2.4 Planung einer wandlungsfähigen vernetzten Produktion nach LÖFFLER (2011)

Das von LÖFFLER (2011) entwickelte Vorgehen zur kontinuierlichen Planung und Anpassung wandlungsfähiger Fabrikstrukturen auf Netzwerkebene verfolgt das Ziel einer optimalen Vernetzung von Produktionsstandorten und der Auslegung zukünftiger Kapazitäten in einem von Veränderungen geprägten globalen Unternehmensumfeld. Dabei wird eine Erweiterung der Definition des Strukturbegriffs vorgenommen (LÖFFLER 2011, S. 20): „Eine Fabrikstruktur ist definiert über die Systemelemente der Produkte, Ressourcen, Kapazitäten, Technologien, die Standortprofile und räumliche Lage, die Prozesse, die Eigen- und Fremdfertigung sowie die zwischen diesen Elementen bestehenden Relationen“. Die entwickelte Methode gliedert sich in fünf Phasen (LÖFFLER 2011, S. 65-69): In der ersten Phase wird ein Fabrikstrukturmodell, basierend auf einer Analyse der Produkt- und Produktionsstrukturen, mit einem Fokus auf notwendige bzw. verfügbare Kapazitäten erstellt. Dieses Modell dient als Grundlage für die iterative Durchführung der Phasen 2 bis 5. Phase 2 beinhaltet die Analyse geplanter Veränderungen durch die Identifikation von Veränderungstreibern und deren Synchronisation in einem sog. Technologiekalender. Dabei werden auch Abhängigkeiten zwischen den Treibern berücksichtigt. In Phase 3 kommt die Software *Factory Variation Planner* zum Einsatz, die eine systematische Variation der Ist-Struktur anhand der in Phase 2 erzeugten Zukunftsszenarien unter Abbildung von Wirkbeziehungen zwischen Veränderungstreibern und Fabriksegmenten ermöglicht (LÖFFLER 2011, S. 84-86). Darauf aufbauend, werden in Phase 4 Konzepte alternativer Fabrikstrukturvarianten zur Anpassung an zukünftige Kapazitätsbedarfe mit einem langfristigen Planungshorizont erstellt und in Phase 5 wird ein optimales Konzept ausgewählt.

Der Ansatz von LÖFFLER (2011) bezieht zwar in zwei Modulen relevante Wirkbeziehungen ein, der Fokus bei der Gestaltung der Veränderungsfähigkeit liegt jedoch primär auf der Bereitstellung optimaler Kapazitäten im Produktionsnetzwerk auf Basis der zu produzierenden Stückzahl und Varianten.

3.2.5 Methode zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit nach KOCH (2011)

Die Methode nach KOCH (2011) baut auf der Arbeit von HERNÁNDEZ MORALES (2003) auf und ergänzt diese um den Aspekt der soziotechnischen Wandlungsfähigkeit. Sie bezieht diese also auf das soziale Fabriksystem, in dessen Mittelpunkt der Mensch steht. Dazu werden zu den sechs von HERNÁNDEZ MORALES (2003) identifizierten Wandlungsbefähigern sieben weitere soziotechnische Wandlungsbefähiger definiert (KOCH 2011, S. 119-123): Steuerungsfähigkeit, Regelungsfähigkeit, Kreativität, Zukunftsgewandtheit, Entwicklungsfähigkeit, Lernfähigkeit und Vernetzungsfähigkeit. KOCH (2011) weist auf die Schwierigkeit der Operationalisierung dieser recht abstrakten Wandlungsbefähiger hin und leitet konkretere sog. Stellhebel aus ihnen ab (KOCH 2011, S. 122). Für das technische Subsystem zieht er die von HEGER (2007, S. 70-101) definierten Wandlungspotenzialmerkmale als Stellhebel heran. Zur Beschreibung der aktuellen Wandlungsfähigkeit werden morphologische Kästen verwendet, in denen die Werte der einzelnen Wandlungsbefähiger zu dokumentieren sind (Abb. 3.4).

Das entstehende Ist-Profil der Wandlungsfähigkeit wird mit dem geforderten Soll-Profil verglichen. Zur Herleitung der geforderten Wandlungsfähigkeit kommt, ähnlich wie bei HERNÁNDEZ MORALES (2003), die Szenariotechnik zum Einsatz, mit dem Unterschied, dass anstelle des Szenario-Transfers eine SWOT[34]-Analyse verwendet wird (KOCH 2011, S. 165). Dabei wird beispielsweise als Chance die Situation aufgefasst, in der die in einem Szenario auftretenden Veränderungen in hohem Maße mit Wandlungsfähigkeit der betroffenen Fabrikobjekte einhergehen. Im nächsten Schritt der Methode werden auf Basis der SWOT-Analyse und der Differenzen zwisch en den Soll- und Ist-Profilen Handlungsalternativen abgeleitet (Abb. 3.4).

Diese werden anschließend mithilfe einer Nutzwertanalyse (Abb. 3.4) durch monetäre und nicht-monetäre Kriterien bewertet (KOCH 2011, S. 189-203). Für die monetäre Bewertung

[34] SWOT steht für Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats (Deutsch: Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken) (KOCH 2011, S. 165).

kommt der Kapitalwert, dessen Unschärfe durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Wandlungshäufigkeit modelliert wird, zum Einsatz. Die Wandlungshäufigkeit ist nach HEGER (2007, S. 114-115) definiert als die Anzahl der Wandlungsprozesse pro Jahr. Als Ergebnis des dritten Schrittes der Methode wird eine wirtschaftliche Empfehlung zur Umsetzung einer Handlungsalternative gegeben, die im vierten Schritt erfolgt.

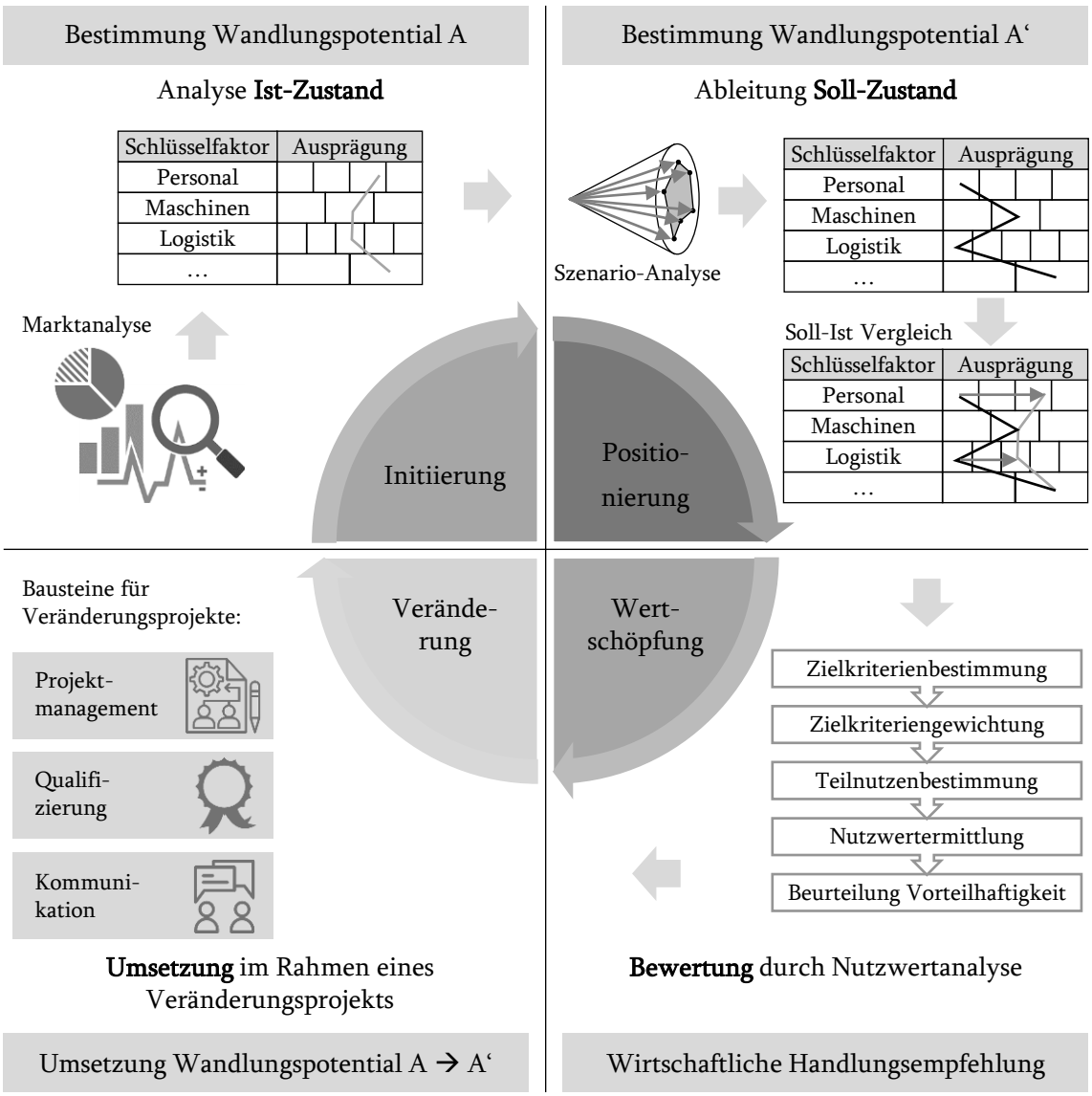


Abb. 3.4: Methode zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit nach KOCH (2011, S. 126).

Die von KOCH (2011) entwickelte Methode weist einen weit gesteckten Bezugsrahmen auf: Aspekte der wandlungsfähigen Fabrikgestaltung, sowohl im technischen als auch im sozialen Subsystem, werden behandelt und der Ist- und Sollzustand der Wandlungsfähigkeit ermittelt, Handlungsalternativen bewertet und auch die Umsetzung wird thematisiert. Dabei

werden jedoch, ähnlich wie bei HERNÁNDEZ MORALES (2003), Wirkbeziehungen zwischen den Wandlungsbefähigern sowie den Stellhebeln nicht berücksichtigt.

3.2.6 Methode zur Adaption von Produktionsstrukturen nach POHL (2014)

Die Ausarbeitung von POHL (2014) verfolgt das Ziel, Adaptionen von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von produktionsrelevanten Lebenszyklen systematisch zu identifizieren, zu planen und zu bewerten. Zu diesem Zweck wird eine dreistufige Methode konzipiert, in deren erster Phase der Adaptionsbedarf unter Berücksichtigung der Lebenszyklusverläufe von Betriebsmitteln, Technologien und Produkten identifiziert wird (POHL 2014, S. 61-83). Ein wichtiger Aspekt ist der Einbezug von Wechselwirkungen zwischen den Lebenszyklen und die Modellierung von Unsicherheiten[35] mit Bezug auf das entwickelte Kostenmodell. In der zweiten Phase werden Adaptionsszenarien durch die unterschiedliche Kombination der zeitlichen Abfolgen von Strukturmaßnahmen entwickelt (POHL 2014, S. 84-92). Im Rahmen der sich anschließenden Bewertung (Phase 3) wird unter Verwendung einer unternehmensspezifischen monetären Zielgröße (z. B. dem Kapitalwert) untersucht, welche Kostenvorteile durch die zeitliche Abstimmung der Strukturmaßnahmen erzielt werden können (POHL 2014, S. 93-105). Die Unsicherheit der monetären Zielgröße wird dabei mithilfe der Monte-Carlo-Simulation für jedes Adaptionsszenario numerisch simuliert und anschließend analysiert, um Handlungsempfehlungen zur Reduktion der durch die Unsicherheit auftretenden Risiken abzuleiten.

Im Gegensatz zu den Ansätzen von HERNÁNDEZ MORALES (2003), LÖFFLER (2011) und KOCH (2011) bezieht sich die Arbeit von POHL (2014) nicht auf die Auswahl und Umsetzung von Wandlungsbefähigern, sondern vielmehr auf eine zeitlich optimale Organisation von Strukturadaptionen. Wechselwirkungen zwischen den Lebenszyklen sowie zwischen den unsicheren Einflussfaktoren im Kostenmodell werden berücksichtigt. Abhängigkeiten zwischen den Strukturmaßnahmen, durch die eine Bündelung derselben erfolgen kann, werden zwar erwähnt, aber nicht weiter detailliert.

[35] Das von POHL (2014) verwendete Klassifikationsschema für Unsicherheiten wird an dieser Stelle nicht weiter erläutert, da es der Ausarbeitung von KREBS (2012) entnommen ist, die in Kap. 3.3 ausführlich vorgestellt wird.

3.2.7 Planung der systematischen Wandlungsfähigkeit nach KLEMKE (2014)

KLEMKE (2014) entwickelt eine Methode zur Planung der systemischen Wandlungsfähigkeit einer Fabrik unter Berücksichtigung der Stückzahl-, Varianten-, Kosten-, Zeit- und Qualitätsziele der Produktion. Das Vorgehen baut auf dem Regelkreis der Veränderungsfähigkeit nach NYHUIS ET AL. (2010) und AZAB ET AL. (2013) (siehe Kap. 3.1.2) auf und bezieht damit sowohl Flexibilität als auch Wandlungsfähigkeit als Zielgrößen ein. Als Grundlage der Methode dient ein Modell der Produktion, das aus Organisations-, Stückkosten-, Prozess-, Logistik- und Raumsicht aufgebaut ist und in der sog. Wandlungsgrafik visualisiert wird (KLEMKE 2014, S. 52). Die Methode umfasst zwei zentrale Schritte: Das Wandlungsmonitoring (Schritt 1, KLEMKE 2014, S. 84-93) umfasst die Analyse des Produktionsprogramms mithilfe des sog. Varianteninformationsbogens, der produktbezogene Eigenschaften wie Form, Farbe, Abmessungen, Gewicht und Stückzahlentwicklungen erfasst. Des Weiteren werden im Wandlungsmonitoring externe und interne Veränderungstreiber unter Zuhilfenahme eines branchenunabhängigen und allgemeingültigen Veränderungstreiberkataloges identifiziert. Dieser Katalog wurde auf Basis einer Literaturrecherche und Expertenbefragungen entwickelt (KLEMKE 2014, S. 63-66). Im Rahmen der Wandlungsfähigkeitsbewertung (Schritt 2, KLEMKE 2014, S. 93-107) wird unter Verwendung des Regelkreises der Veränderungsfähigkeit überprüft, ob für die identifizierten Treiberentwicklungen die bestehende Flexibilität ausreichend ist, Wandlungsfähigkeit benötigt wird, oder, falls beide Größen nicht hinreichend ausgeprägt sind, Maßnahmen zur Erhöhung dieser ergriffen werden müssen. Dabei wird das zugrunde liegende Modell der Produktion verwendet, um mögliche, durch die Maßnahmen hervorgerufene negative Auswirkungen zwischen den Sichten der Wandlungsgrafik zu identifizieren und durch eine Anpassung der Maßnahmen zu vermeiden (KLEMKE 2014, S. 95-99).

Positive Abhängigkeiten werden jedoch nicht betrachtet. Auch eine Modellierung von Unschärfe und Unsicherheit der Treiber bzw. der im Varianteninformationsbogen erhobenen produktbezogenen Planungsparameter wird nicht thematisiert.

3.2.8 Gestaltung veränderungsfähiger Produktionssysteme nach BENKAMOUN (2016)

Basierend auf einer Literaturanalyse bzgl. der Forschungsbereiche Veränderungsfähige Produktionssysteme, „Design for Changeability“ und Veränderungsfähigkeit im System-Engineering-Kontext entwickelt BENKAMOUN (2016) eine Methode zur Gestaltung veränderungsfähiger Produktionssysteme unter Verwendung einer systemtheoretischen Herangehensweise. Zunächst wird ein Ansatz zur systematischen Modellierung von veränderungsfähigen Produktionssystemen präsentiert, der nicht nur physische Komponenten, sondern mithilfe einer ganzheitlichen Systemarchitektur auch organisatorische Elemente (wie z. B. die Produktionssteuerung oder Informationssysteme) umfasst (BENKAMOUN 2016, S. 73-92). Dabei werden Design-Struktur- und Multiple-Domain-Matrizen zur Modellierung von Wirkbeziehungen zwischen den Systemelementen eingesetzt.

Den Kern der Arbeit stellt eine Methode zur Gestaltung und zum Management der Veränderungsfähigkeit mit Bezug zu den Lebenszyklusphasen der Fabrik dar (Abb. 3.5) (BENKAMOUN 2016, S. 117-130). Zunächst werden Prognosen für zukünftige Veränderungen in Form von Szenarien erstellt (Abb. 3.5, (1)). Für diese Szenarien werden unter Einbezug der bestehenden Veränderungsfähigkeit unterschiedliche Konfigurationen des Produktionssystems entwickelt (2). Dabei wird geprüft, inwiefern die aktuelle Veränderungsfähigkeit der Fabrik ausreicht bzw. in zukünftigen Konfigurationen sinnvoll wiederverwendet werden kann, um Rekonfigurationskosten zu minimieren.

Ob eine Anpassung der Veränderungsfähigkeit und damit des Produktionssystems erforderlich ist und in welchem Bereich mit welcher Intensität diese zu realisieren ist, wird im ersten Schritt der dreistufigen Veränderungsfähigkeits-Anpassung (3), der Veränderungsfähigkeits-Bedarfsanalyse (a), untersucht. Handlungsalternativen zur Steigerung der Veränderungsfähigkeit werden in der Befähiger-Synthese (b) entwickelt, wobei die Befähiger Modularität und Integrierbarkeit fokussiert werden. Diese sind lt. BENKAMOUN (2016, S. 125) besonders geeignet, um die Fortpflanzung von Änderungen im System zu minimieren und die Produktion aufwandsarm zu rekonfigurieren. Die Handlungsalternativen werden anschließend durch die Ermittlung der jeweiligen Kapitalrenditen (Return-on-Invest) monetär bewertet (c). Stellt die Lösung mit der höchsten Kapitalrendite eine ausreichend hohe Veränderungsfähigkeit bereit, wird diese umgesetzt. Andernfalls werden so lange

neue Konfigurationen generiert und bewertet, bis eine ausreichend gute Lösung ermittelt wurde.

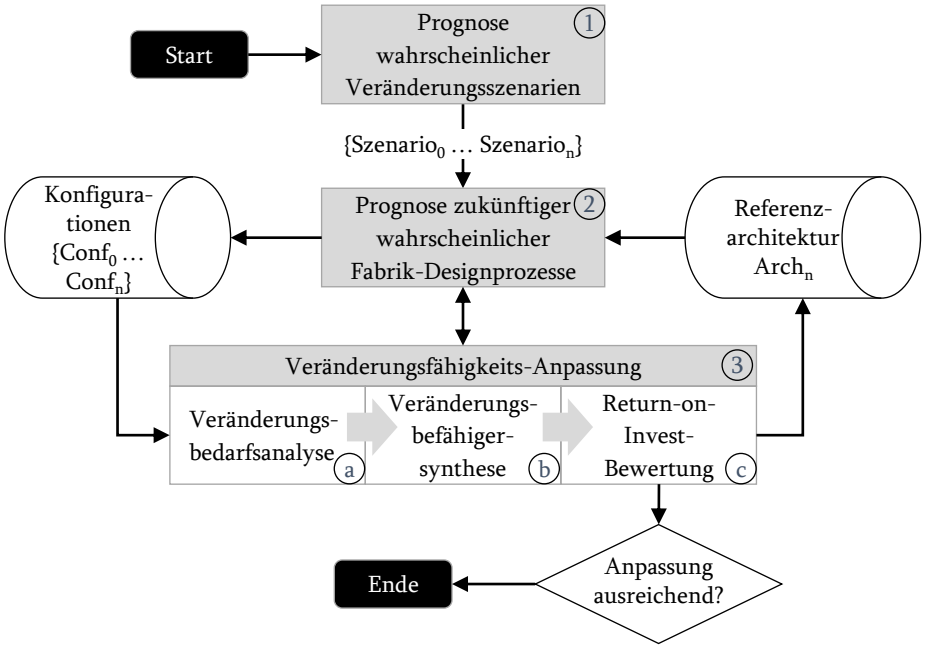


Abb. 3.5: Design-for-Changeability-Prozessmodell nach BENKAMOUN (2016, S. 117-120).

Der von BENKAMOUN (2016) entwickelte Ansatz erlaubt nicht nur die initiale Gestaltung der Veränderungsfähigkeit, sondern v. a. die Betrachtung einer „Re-Design-Phase“, in der die dem Produktionssystem inhärente Veränderungsfähigkeit aktiviert und gewinnbringend genutzt werden kann. Damit wird eine wirtschaftliche Verlängerung des Lebenszyklus von Brownfield-Fabriken angestrebt. Die Methode bleibt jedoch auf einem recht generischen Level, es wird beispielsweise nicht weiter detailliert, wie sinnvolle Veränderungsbefähiger-Kombinationen ermittelt werden können.

3.2.9 Zusammenfassende Bewertung der Planungsmethoden

In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der Literaturanalyse zusammengefasst und die existierenden Ansätze anhand von elf Kriterien in vier Gruppen bewertet. Die Kriterien wurden so ausgewählt, dass sie für die Erreichung der Zielsetzung dieser Arbeit wesentliche Aspekte der vorhandenen Ansätze widerspiegeln und auf Basis der Literaturrecherche in die folgenden vier Gruppen aggregiert: Fabriksystemebene, Auswirkungen von Veränderungstreibern, Spezifizierung der Veränderungsfähigkeit sowie Weitere Kriterien.

Die drei Kriterien der ersten Gruppe zeigen, auf welche Fabriksystemebene (siehe auch Abb. 1.3) der Betrachtungsfokus des jeweiligen Ansatzes gelegt wird. Aus der in Tabelle 3.1

vorgenommenen Bewertung wird ersichtlich, dass die Mehrzahl der analysierten Arbeiten den Fokus auf die Fabriksystemebene *Segment/Linie* legt. Einige Arbeiten beziehen außerdem Aspekte der Ebene *Zelle/Arbeitsstation* ein. Lediglich LÖFFLER (2011) fokussiert die *Netzwerkebene*.

Tabelle 3.1: Bewertung der Literatur zu Planungsmethoden für veränderungsfähige Fabriken.

Legende

- ⬤ trifft voll zu/Fokus
- ● trifft überwiegend zu/behandelt
- • trifft teilweise zu/verwendet
- · trifft kaum zu/erwähnt
- trifft nicht zu/nicht betrachtet

Kriterien	HERNÁNDEZ MORALES (2003)	CISEK (2005)	GÜNTHER (2005)	LÖFFLER (2011)	KOCH (2011)	POHL (2014)	KLEMKE (2014)	BENKAMOUN (2016)
Fabriksystemebene								
Netzwerk				⬤				
Segment/Linie	⬤	⬤	●	•	⬤	⬤	⬤	⬤
Zelle/Arbeitsstation	·	⬤	⬤			⬤		•
Auswirkungen von Veränderungstreibern								
Szenariotechnik	⬤	·		•	⬤	·	·	⬤
Unschärfe der Planungsparameter	●	●		·	●	⬤	·	
Klassifizierung v. Unsicherheit/Unschärfe						●		
Abhängigkeiten zwischen Uns./Unschärfen				●		⬤		
Spezifizierung der Veränderungsfähigkeit								
Anforderungsbasierte Auswahl von VBF	●	●		⬤	⬤	⬤	⬤	⬤
Konkrete VBF/Maßnahmen	●	⬤			⬤	⬤	⬤	●
Wirkbeziehungen zwischen VBF						●	●	
Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit							⬤	•
Weitere Kriterien								
Partizipationsmöglichkeiten	●	·	⬤	•	●	●	●	●

In der zweiten Kriteriengruppe Auswirkungen von Veränderungstreibern wird bewertet, auf welche Weise diese Auswirkungen in den vorgestellten Ansätzen berücksichtigt werden. HERNÁNDEZ MORALES (2003), KOCH (2011) und BENKAMOUN (2016) setzen die *Szena-*

riotechnik ein, um zukünftige Entwicklungen zu antizipieren. Die *Unschärfe der Planungsparameter* wird von einem Teil der Autoren zwar erwähnt bzw. verwendet, steht jedoch nicht im Fokus der analysierten Ansätze. Die *Klassifizierung von* bzw. *Abhängigkeiten zwischen Unsicherheit und Unschärfe* wird lediglich von POHL (2014) bzw. POHL (2014) und LÖFFLER (2011) zum Teil behandelt. Auf diesen Grundlagen wird im Hauptteil der vorliegenden Arbeit aufgebaut.

Unter die dritte Gruppe fallen Kriterien zur Spezifizierung der Veränderungsfähigkeit. Durch diese Kriteriengruppe wird geprüft, wie in den analysierten Ansätzen die Veränderungsfähigkeit in der Fabrik umgesetzt wird bzw. wie Veränderungsbefähiger zu deren Operationalisierung eingesetzt werden. Das Kriterium *Anforderungsbasierte Auswahl von VBF* ist erfüllt, wenn bestimmte VBF für spezifische, zuvor analysierte Anforderungen, wie beispielsweise zur Kompensation einer Unschärfe oder für die Befähigung der Fabrik zur Bewältigung eines bestimmten Szenarios, gezielt ausgewählt werden. Die Mehrzahl der Ansätze erfüllt dieses Kriterium überwiegend, die Anforderungen werden jedoch nicht aus der Unschärfe der Datengrundlage abgeleitet. Eine *Konkretisierung der VBF* durch gezielte Maßnahmen erfolgt in den Arbeiten von CISEK (2005), KOCH (2011), POHL (2014) und KLEMKE (2014). Die *Wirkbeziehungen zwischen VBF* werden in keinem der vorgestellten Ansätze zur Planung veränderungsfähiger Fabriken fokussiert. Der gleichzeitige Einbezug unterschiedlicher Veränderungsstrategien wie Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit *(Mehrdimensionalität)* stellt das vierte Kriterium dieser Gruppe dar. Lediglich KLEMKE (2014) bezieht unterschiedliche Veränderungsstrategien in die entwickelte Methode ein.

Außerdem werden die *Möglichkeiten zur Partizipation* der Planungsbeteiligten bei den unterschiedlichen Methoden bewertet (Weitere Kriterien). Alle analysierten Ansätze sehen unterschiedlich stark ausgeprägte Partizipationsmöglichkeiten vor.

3.3 Bewertungsmethoden für veränderungsfähige Fabrikstrukturen

Obwohl die Bewertung von Veränderungsfähigkeit nicht im Fokus dieser Arbeit steht, werden im Folgenden einige (Teil-)Ansätze vorgestellt und analysiert, da in den Bereichen Klassifikation und Modellierung von Unsicherheit und Unschärfe, Auswirkungsanalyse von Veränderungstreibern und Konkretisierung von Veränderungsbefähigern relevante Forschungsergebnisse erarbeitet wurden.

3.3.1 Bewertung strukturvariabler Produktionssysteme nach SESTERHENN (2003)

SESTERHENN (2003) entwickelt in seiner Bewertungssystematik zur lebenszyklusorientierten Gestaltung betriebsvariabler Produktionssysteme ein sog. Variabilitätsportfolio zur Identifikation von Variabilitätsanforderungen an ein Produktionssystem. Dabei werden zunächst die historischen Ist-Absatzverläufe der Produkte mit den Plan-Absatzverläufen zur Analyse der Abweichungen verglichen. Auf Basis der Volatilität des Absatzverlaufes und dessen Standardabweichung, welche die Dimensionen des Portfolios darstellen, wird eine Klassifizierung der unterschiedlichen Produkte bezüglich ihres Lebenszyklusverhaltens vorgenommen und der Variabilitätsbedarf der Produktionssysteme abgeleitet (SESTERHENN 2003, S. 60-62). Mit diesem Vorgehen stellt die Methode von SESTERHENN (2003) einen der wenigen Ansätze dar, der die Unschärfe eines Planungsparameters modelliert und diese als Grundlage für die Auslegung der Veränderungsfähigkeit eines Produktionssystems verwendet. Dabei beschränkt sich die Anwendung des Variabilitätsportfolios jedoch auf die Absatzstückzahl und den Variantenmix.

3.3.2 Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten nach HEGER (2007)

Das Ziel der Arbeit von HEGER (2007) ist die Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten unter Berücksichtigung monetärer und nichtmonetärer Kriterien, um zwischen unterschiedlichen Fabrikobjektalternativen eine begründete Entscheidung zur Umsetzung treffen zu können. Fabrikobjekte nach Heger sind beispielsweise Tragwerk des Gebäudes, Lagermittel, Produktionsmittel oder das Layout.

Die Methode umfasst drei Verfahren. In der Wandlungspotenzialwert-Analyse (HEGER 2007, S. 104-105) wird das Wandlungspotenzial von Fabrikobjekten bestimmt und ein Vergleich der aktuellen mit der benötigten Wandlungsfähigkeit eines Fabrikobjekts durchgeführt. Dazu kommt ein Zielsystem der Wandlungsfähigkeit (oberste Ebene) zum Einsatz, das unterschiedliche Detaillierungsgrade der Wandlungsbefähiger[36] unterscheidet (HEGER 2007, S. 71): Die acht Befähiger Mobilität, Modularität, Universalität, Standardisierung, Skalierbarkeit, Neutralität, Kompatibilität und objektspezifisches Wandlungspotenzial

[36] HEGER (2007, S. 71) verwendet in seiner Ausarbeitung nicht den Begriff Wandlungsbefähiger, sondern in der Reihenfolge des zunehmenden Detaillierungsgrades geordnet die Begriffe Wandlungspotenzial, Wandlungspotenzialart und Wandlungspotenzialmerkmal.

werden als Ziele der zweiten Ebene herangezogen. Durch die Zuordnung dieser acht Befähiger zu den Fabrikobjekten leitet HEGER 232 sog. Wandlungspotenzialmerkmale als Ziele der dritten Ebene ab. Die Ist- und Soll-Ausprägung der Wandlungspotenzialmerkmale wird für jede Wandlungsbefähiger-Fabrikobjekt-Kombination mithilfe einer Skala zwischen 0 % und 100 % (von 0 % = sehr niedriges Wandlungspotenzial bis 100 % = sehr hohes Wandlungspotenzial) bewertet und anschließend die Ist-Soll-Differenz ermittelt. Das zweite Verfahren der Methode ist die Wandlungswirtschaftlichkeits-Analyse, in der jedes Fabrikobjekt mit seiner spezifischen Wandlungsfähigkeit hinsichtlich seines Kapitalwerts analysiert wird (HEGER 2007, S. 110-125). Zu diesem Zweck kommt eine adaptierte Kapitalwertmethode zum Einsatz, die den wandlungsspezifischen Kapitalwert unter Einbezug der Zahlungsströme, die in Bezug zu den zukünftigen Veränderungsprozessen stehen, berechnet. Die Standardabweichung der Wandlungshäufigkeit eines Fabrikobjektes fließt in die Berechnung ein und wird zur Modellierung der Unschärfe des Kapitalwertes verwendet. Im dritten Verfahren, der Wandlungsnutzwert-Analyse, wird eine Bewertung auf Basis nichtmonetärer Kriterien über eine klassische Nutzwertanalyse durchgeführt (HEGER 2007, S. 128-130). Anschließend wird eine Empfehlung zur Umsetzung eines wandlungsoptimalen Fabrikobjektes ausgesprochen.

HEGER (2007) entwickelt in seiner Methode eine detaillierte Auflistung konkreter Befähiger für jedes Fabrikobjekt, die eine realitätsnahe, aber aufwendige Analyse der aktuellen und notwendigen Wandlungsfähigkeit erlaubt. Auf dieser Grundlage entsteht ein ganzheitlicher Ansatz zur Bewertung von Wandlungsfähigkeit mit Berücksichtigung der Unschärfe der monetären Ergebnisgröße Kapitalwert. Weitere Unschärfen von Planungsparametern werden jedoch, ebenso wie Wirkbeziehungen zwischen Wandlungsbefähigern, nicht berücksichtigt.

3.3.3 Wirtschaftlichkeitsbewertung wandlungsfähiger Produktionssysteme nach MÖLLER (2008)

Die von MÖLLER (2008) entwickelte Methode verfolgt das Ziel einer wirtschaftlichen Bewertung und eines Vergleichs von veränderungsfähigen technisch-organisatorischen Alternativen zur Gestaltung eines Produktionssystems unter Verwendung der *Realoptionstheorie*. Dabei wird Veränderungsfähigkeit im Sinne einer finanzwirtschaftlichen Realoption

interpretiert, die es dem Entscheider ermöglicht, ihn aber nicht verpflichtet, zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft das Potenzial der Veränderungsfähigkeit in Form von beispielsweise Umbaumaßnahmen auszuschöpfen (MÖLLER 2008, S. 109). Die Grundlagen für dieses Vorgehen werden in einer umfangreichen Analyse der Literatur zu Realoptionen und deren Übertragung auf wandlungsfähige Produktionssysteme gelegt. Der Ansatz von MÖLLER (2008) setzt dabei an der Stelle im Planungsprozess an, bei der bereits alternative Gestaltungsmöglichkeiten des Produktionssystems und deren jeweilige Veränderungsfähigkeit bekannt sind. Eine grundlegende Eigenschaft der Option ist, dass diese mit Unsicherheit behaftet ist, die durch die unbekannte Preisentwicklung des Underlying[37] entsteht. Bei der produktionssystembezogenen Realoption ist dies die Unschärfe der Planungsparameter. Je größer beispielsweise die Unschärfe der Absatzmenge ist, desto mehr ist die Realoption *Erweiter- und reduzierbare Gebäude* wert, da die dadurch vorhandene Veränderungsfähigkeit eine Kompensation der Unschärfe ermöglicht. Die Unschärfen der Planungsparameter identifiziert MÖLLER (2008, S. 90-111) mithilfe des von CISEK ET AL. (2002) entwickelten sog. *Rezeptormodells*, das eine Analogie zwischen den Rezeptoren menschlicher Zellen und der Auswirkungen von Umfeldturbulenz auf das Produktionssystem darstellt. Dabei werden folgende Rezeptoren, die jeweils bestimmte umfeldbedingte Veränderungstreiber aufnehmen und an die Produktion weiterleiten, identifiziert: Produkt, Stückzahl, Zeit, Kosten und Qualität sowie, durch MÖLLER (2008, S. 23-25) ergänzt, Technologie (Abb. 3.6, abgekürzt mit P, S, Z, K, Q und T, siehe Legende).

Die durch die Veränderungstreiber entstehenden Unschärfen der Planungsdaten werden nach Relevanz in die Kategorien A bis C unterteilt, wobei nur A-Unschärfen als ausreichend signifikant für die Identifikation möglicher Realoptionen angesehen werden (MÖLLER 2008, S. 108-110). Anschließend werden Handlungsmöglichkeiten, wie beispielsweise Kurzarbeit bei unscharfer Stückzahl, in Bezug auf deren Wirksamkeit zur Kompensation der ermittelten Unschärfen bewertet. Daraufhin wird eine Filterung der Alternativen vorgenommen und ein reduzierter Katalog der Handlungsmöglichkeiten erstellt (Abb. 3.6).

Die Unschärfen von dynamischen Einflussgrößen werden in geeigneter Form modelliert. MÖLLER (2008, S. 118-123) unterscheidet zwischen stochastischen Ereignissen, die mittels Bernoulli-Verteilung (diskret, Eintritt ja / nein) oder Normalverteilung (stetig) modelliert

[37] Das Underlying einer Option ist nach MÖLLER (2008, S. 36) „der Vermögensgegenstand, der ge- oder verkauft werden darf".

werden und stochastischen Prozessen (zeitabhängig), die je nach Ausprägung als Random Walk oder Brownsche Bewegung abgebildet werden.

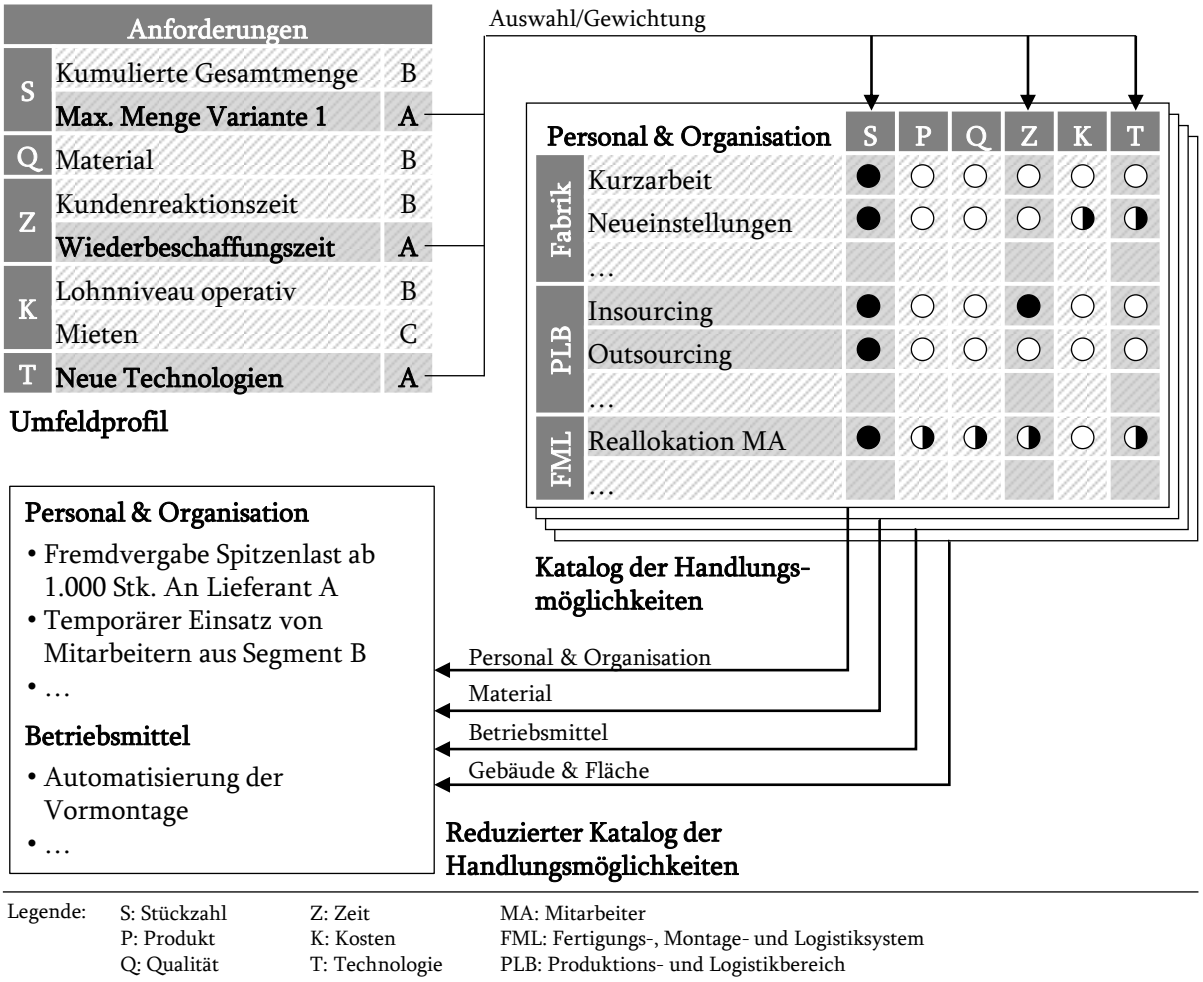


Abb. 3.6: Bestimmung von Handlungsmöglichkeiten auf Basis vorhandener Unschärfen nach MÖLLER (2008, S. 109).

Die Reduzierung der Unschärfe durch Informationszuwachs mit fortschreitender Zeit bei stochastischen Prozessen und verketteten Ereignissen analysiert MÖLLER (2008, S. 134-138) mithilfe von Bäumen. Zur Simulation von Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den einzelnen Knoten eines Baumes kommt die Monte-Carlo-Simulation zum Einsatz. Unter Einbezug der unscharfen Einflussfaktoren wird abschließend ein Kapitalwert für jede Alternative durch Berücksichtigung des Wertes vorhandener Realoptionen ermittelt.

Der Ansatz von MÖLLER (2008) liefert wichtige Grundlagen für die Ableitung von Handlungsmöglichkeiten, basierend auf vorhandenen Unschärfen (Abb. 3.6). Diese werden jedoch, da es sich um eine Bewertungs- und keine Planungsmethode handelt, nicht weiter detailliert und auch Wirkbeziehungen werden nicht behandelt. Bei der Modellierung von

Unschärfen wird MÖLLER (2008) wesentlich konkreter als vorherige Arbeiten, die Fortpflanzung von Unschärfen durch die Verarbeitung von Daten im Planungsprozess wird jedoch nicht betrachtet.

3.3.4 Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung nach RÜHL (2010)

Ziel des Ansatzes nach RÜHL (2010) ist die frühzeitige Prognose von Unsicherheit und Risiko schon während der Produktentwicklung, um die in der Produktion benötigte Stückzahl- und Variantenflexibilität monetär zu bewerten und somit eine Auswahl zwischen Planungsalternativen treffen zu können. Die Arbeit basiert auf einer empirischen Untersuchung, deren Ergebnis den Mangel an einer zuverlässigen Methode zur Kostenschätzung sowie zur quantitativen Bewertung der benötigten Flexibilität belegt. Die Unschärfe der Eingangsdaten wird zunächst geschätzt und mithilfe einer Kombination aus Monte-Carlo- und Ablaufsimulation modelliert. Die Auswirkungen der Unschärfen in unterschiedlichen Produktionsszenarien werden anschließend analysiert, wobei neben den stochastischen auch deterministische Parameter in das Modell einfließen. Ergebnis der Berechnung sind die für das jeweilige Szenario zutreffende Gesamtanlageneffektivität (OEE) sowie die Herstellkosten. Je nachdem, welche Stückzahl- und Variantenflexibilität eingeplant wird, kalkuliert der entwickelte Ansatz die damit verbundene Varianz der Herstellkosten, wobei das monetäre Risiko als sog. Value at Risk bestimmt wird.

Das von RÜHL (2010) entwickelte Modell fokussiert für die Bewertung der Flexibilität die Größen OEE und Herstellkosten sowie deren Varianz auf Basis der unscharfen Eingangsparameter. Die Flexibilität wird demnach indirekt bewertet, Wandlungsfähigkeit oder andere Veränderungsstrategien werden nicht betrachtet. Die Unschärfen werden entweder als gegeben angenommen oder geschätzt, deren Fortpflanzung im Planungsprozess, ebenso wie die gezielte Auswahl von VBF stehen nicht im Mittelpunkt der Arbeit.

3.3.5 Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Unsicherheit nach KREBS (2012)

KREBS (2012) entwickelt eine Methode zur Bewertung vernetzter Produktionsstandortalternativen unter Berücksichtigung qualitativer und quantitativer Unsicherheiten. Die für die Bewertung relevanten Einflussfaktoren und deren Unschärfe sowie weitere Unsicher-

heiten werden zunächst identifiziert und anschließend in einem Unsicherheitsmodell modelliert. Für die Modellierung quantitativer Unsicherheiten kommen Random Walk (vorgängerabhängig, diskret), Itô-Prozess (vorgängerabhängig, stetig), diskrete Verteilungen für jedes Ereignis (vorgängerunabhängig, diskret) sowie die Beta- oder Normalverteilung (vorgängerunabhängig, stetig) zum Einsatz (KREBS 2012, S. 68-73). Qualitative Unsicherheiten wie beispielsweise Zuverlässigkeit von Lieferanten oder Sprach- und Kommunikationsbarrieren bildet KREBS (2012, S. 73-81) durch Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen ab. Im Rahmen der entwickelten Methode werden auch Abhängigkeiten zwischen den identifizierten Unsicherheiten berücksichtigt, die in vier Arten untergliedert werden können (KREBS 2012, S. 81-94):

- Abhängigkeit 1. Art: Berechnungsvorschrift (in Form einer mathematischen Formel) zwischen mehreren quantitativen unsicheren Einflussgrößen.
- Abhängigkeit 2. Art: Korrelationen (messbar als Spearman'scher oder Kendall'scher Korrelationskoeffizient[38]) zwischen 2 quantitativen unsicheren Einflussgrößen.
- Abhängigkeit 3. Art: Wirkbeziehungen (modelliert als Fuzzy-Regelwerk mit WENN-DANN-Verknüpfungen) zwischen quantitativen und qualitativen unsicheren Einflussgrößen.
- Abhängigkeit 4. Art: Wirkbeziehungen (modelliert als Fuzzy-Regelwerk mit WENN-DANN-Verknüpfungen) zwischen mehreren qualitativen unsicheren Einflussgrößen.

Die Bewertung erfolgt im Anschluss an die Modellierung unscharfer Einflussfaktoren durch die Verknüpfung des Unsicherheitsmodells mit dem sog. Kalkulationsmodell, das alle Einflussgrößen sowie deren Berechnungsvorschrift zur Determinierung der monetären Ergebnisgröße (z. B. Kapitalwert jeder Standortalternative) definiert. Unter Verwendung der Monte-Carlo-Simulation werden, ähnlich wie bei MÖLLER (2008, S. 138-139), der Wert sowie die Unschärfe der Einflussgrößen und der monetären Ergebnisgröße[39] für jede Stand-

[38] Diese sog. Rangkorrelationskoeffizienten stellen ein Maß für den Zusammenhang zwischen zwei Variablen dar, der durch eine beliebige monotone Funktion beschrieben werden kann und nicht die Voraussetzung der Linearität der Beziehung zwischen den Variablen erfüllen muss (wie es beim Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizienten der Fall ist) (FAHRMEIR ET AL. 2007, S. 167-169).

[39] Prinzipiell können lt. KREBS (2012, S. 118) unterschiedliche monetäre Ergebnisgrößen verwendet werden. In einem Anwendungsbeispiel wird der Market Value Added (MVA, zur Erklärung sei auf KREBS 2012, S. 28 verwiesen) herangezogen.

ortalternative ermittelt. Um eine Aussage darüber treffen zu können, welche Unsicherheiten bzw. unscharfen Einflussgrößen einen besonders großen Teil der Unschärfe des Bewertungsergebnisses verursachen, kommt eine Sensitivitätsanalyse zum Einsatz. Zur Reduktion dieser Unschärfe und damit auch des durch sie entstandenen Risikos können gezielte Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Die von KREBS (2012) entwickelte Methode dient zwar der Bewertung von Produktionsstandortalternativen und nicht von veränderungsfähigen Fabrikstrukturen, die Ausführungen zur Modellierung von Unschärfe und Unsicherheit sowie Abhängigkeiten zwischen unscharfen Parametern stellen jedoch eine wichtige Grundlage für diese Arbeit dar. Die Grundidee, Wechselwirkungen zwischen unscharfen Parametern gezielt in die Analyse der Unschärfe eines abhängigen Ergebnisparameters einzubeziehen, wird in Kap. 5.3.2 für das Wirkungsgefüge der Daten im Fabrikplanungsprozess adaptiert und weiterentwickelt.

3.3.6 Zusammenfassende Bewertung der Bewertungsmethoden

In Tabelle 3.2 werden die vorgestellten Ansätze zur Bewertung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen anhand der in Kap. 3.2.9 erläuterten Kriterien evaluiert.

In der ersten Kriteriengruppe Fabriksystemebene ergibt sich ein ähnliches Bild wie bei der Bewertung der Planungsmethoden: Die meisten Ansätze fokussieren primär die Fabrikebene *Segment/Linie*, lediglich die Arbeit von KREBS (2012) bezieht sich auf die *Netzwerkebene*.

Die Auswirkungen von Veränderungstreibern werden nicht nur durch die *Szenariotechnik* modelliert. In allen Ansätzen wird die *Unschärfe der Planungsparameter* zumindest teilweise behandelt, einfache *Klassifizierungsschemata für Unschärfe bzw. Unsicherheit* werden verwendet, jedoch nicht erweitert.

In der Arbeit von KREBS (2012) werden *Abhängigkeiten zwischen Unschärfen bzw. Unsicherheiten* behandelt.

Da das Ziel der in Kap. 3.3 vorgestellten Arbeiten die Bewertung und nicht die Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen ist, spielt die Spezifizierung der Veränderungsfähigkeit keine zentrale Rolle. Die *Auswahl von VBF auf Basis bestimmter Anforderungen* wird zwar von SESTERHENN (2003) sowie von MÖLLER (2008) behandelt, steht jedoch nicht im

Fokus. *Konkrete VBF* werden ausschließlich von HEGER (2007) identifiziert und in die Bewertungsmethode einbezogen. Weder *Wirkbeziehungen zwischen VBF* noch die *Mehrdimensionalität von Veränderungsfähigkeit* wird in den vorgestellten Arbeiten thematisiert.

Partizipationsmöglichkeiten für die Planungsbeteiligten sind auch in den vorgestellten Bewertungsmethoden im Allgemeinen gegeben.

Tabelle 3.2: Bewertung der Literatur zu relevanten Bewertungsmethoden.

Legende	**Quelle**				
● trifft voll zu/Fokus ● trifft überwiegend zu/behandelt ● trifft teilweise zu/verwendet • trifft kaum zu/erwähnt trifft nicht zu/nicht betrachtet					
Kriterien	SESTERHENN (2003)	HEGER (2007)	MÖLLER (2008)	RÜHL (2010)	KREBS (2012)
Fabriksystemebene					
Netzwerk				●	●
Segment/Linie	●	●	●	●	
Zelle/Arbeitsstation		●	●		
Auswirkungen von Veränderungstreibern					
Szenariotechnik	●	•	•		
Unschärfe der Planungsparameter	●	●	●	●	●
Klassifizierung v. Unsicherheit/Unschärfe	●	•	●	●	●
Abhängigkeiten zwischen Uns./Unschärfen		●	●	•	●
Spezifizierung der Veränderungsfähigkeit					
Anforderungsbasierte Auswahl von VBF	●	●	●	•	
Konkrete VBF/Maßnahmen	●	●			
Wirkbeziehungen zwischen VBF					
Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit					
Weitere Kriterien					
Partizipationsmöglichkeiten	●	●	●	●	●

3.4 Ontologie der Veränderungsfähigkeit

In den Kapiteln 3.2 und 3.3 wurde der Stand der Forschung bezüglich vorhandener Methoden zur Planung und Bewertung von veränderungsfähigen Fabrikstrukturen aufgearbeitet. In diesem Kapitel werden die in den zuvor beschriebenen Ansätzen relevanten Konzepte und Begrifflichkeiten mit Bezug zur Veränderungsfähigkeit in eine strukturierte, übersichtliche Form gebracht und erläutert. Dazu wird in Anlehnung an BENKAMOUN (2016, S. 59) eine sog. Ontologie der Veränderungsfähigkeit entwickelt und zunächst deren Aufbau beschrieben (Kap. 3.4.1). In den Kap. 3.4.2 bis 3.4.4 erfolgt eine Erläuterung der in der Ontologie enthaltenen Klassen Veränderungsstrategie, Veränderungsbefähiger und -treiber.

3.4.1 Aufbau der Ontologie

Eine Ontologie stellt eine „formale Spezifikation einer gemeinsamen Konzeptualisierung" (BORST 1997, S. 12) dar. In einfacheren Worten ist dies eine durch natürliche Sprache beschreibbare, formale und geordnete Abbildung und Hierarchisierung von Begrifflichkeiten aus einem gemeinsamen Vokabular und der zwischen ihnen bestehenden Relationen mit Bezug auf einen vorgegebenen Betrachtungsbereich (GUARINO ET AL. 2009, KUHLEN ET AL. 2013, S. 207). Nach GREITEMANN (2016, S. 81) ist der „Kern der Ontologiebildung […] die Sammlung von Begriffen, die hierarchisch zu Klassen angeordnet sind." Ontologien bestehen aus Klassen, Typen, Instanzen und deren Relationen zueinander (STUCKENSCHMIDT 2009, S. 22-25). Der Begriff Veränderungsfähigkeit wird als Überklasse definiert, der die Unterklassen Veränderungstreiber, Veränderungsbefähiger und Veränderungsstrategie enthält (Abb. 3.7). Jeder Unterklasse kann eine Menge von Instanzen zugeordnet werden, die wiederum durch Relationen mit anderen Instanzen in Beziehung stehen. Zu den Instanzen der Veränderungsstrategie gehören beispielsweise Flexibilität, Robustheit und Wandlungsfähigkeit.

Instanzen der Klasse Veränderungsbefähiger sind Mobilität, Modularität, Skalierbarkeit etc. Diese Instanzen sind über Relationen mit den jeweiligen Literaturquellen, in denen diese primär behandelt werden, verknüpft. Die Unterklasse der Veränderungsstrategien enthält, in Anlehnung an BENKAMOUN (2016, S. 59), außerdem eine Reihe sog. Typen, die der inhaltlichen Beschreibung bzw. prägnanten Zusammenfassung der Instanzen der Veränderungsstrategie dienen (Abb. 3.7). Die Instanzen der einzelnen Klassen sowie deren Relationen und Typen werden im Folgenden erläutert.

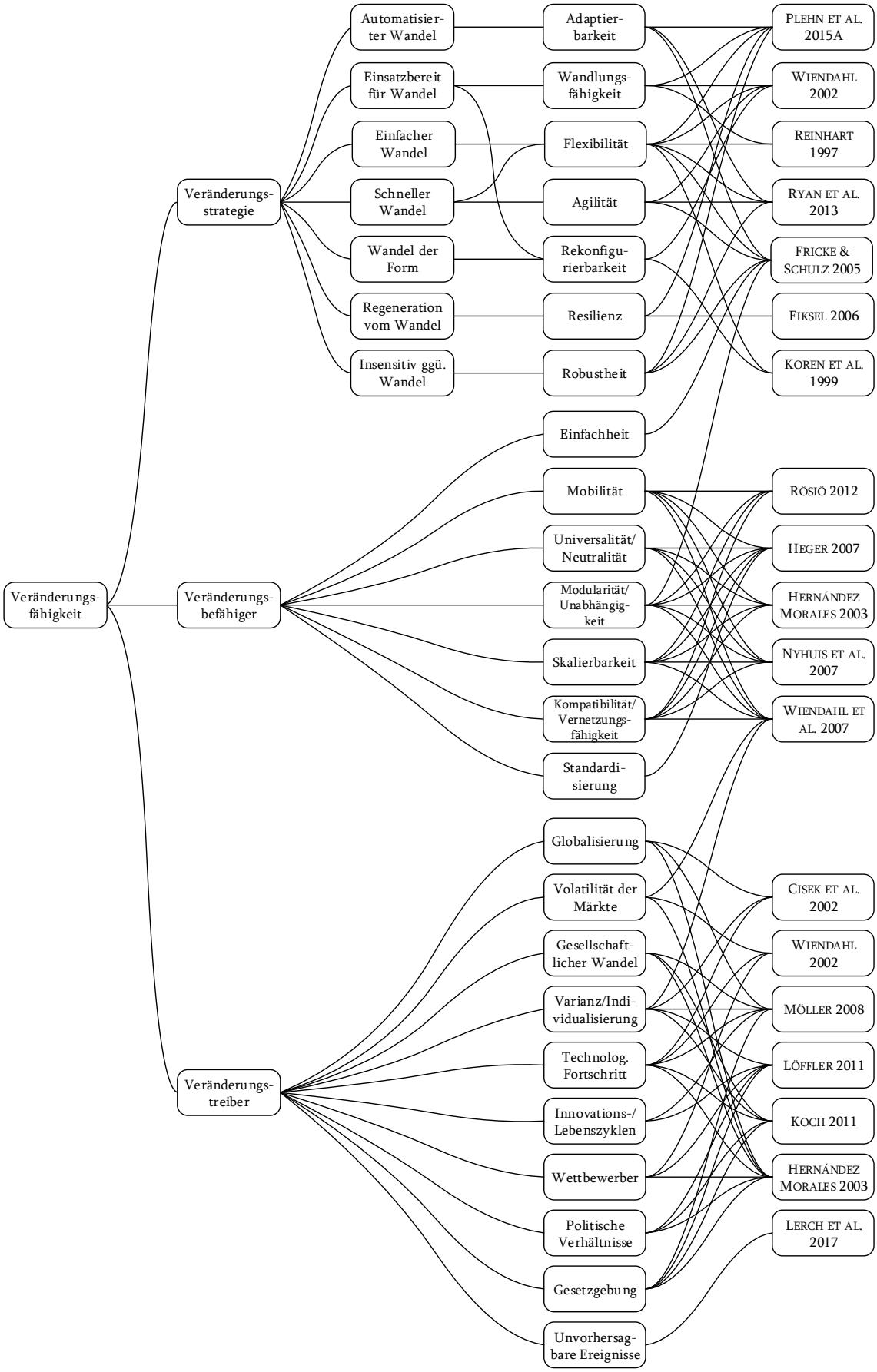


Abb. 3.7: Ontologie der Veränderungsfähigkeit (i. A. a. PLEHN ET AL. 2015A und BENKAMOUN 2016, S. 59).

3.4.2 Veränderungsstrategien

Veränderungsstrategien beschreiben die unterschiedlich ausgeprägten Konzepte eines Unternehmens, um bestmöglich auf den durch die Veränderungstreiber induzierten Wandel zu reagieren. PLEHN ET AL. (2015A) geben einen umfassenden Überblick dieser Strategien.

Robustheit (siehe Kap. 2.1.3) verfolgt dabei das Ziel, die Fabrikstruktur insensitiv gegenüber dem Wandel zu gestalten (FRICKE & SCHULZ 2005, RYAN ET AL. 2013, PLEHN ET AL. 2015A). *Resilienz* ist die Fähigkeit eines Systems, sich von den Auswirkungen externer Störgrößen zu regenerieren und den Ausgangszustand wiederherzustellen (FIKSEL 2006, PLEHN ET AL. 2015A). *Rekonfigurierbarkeit* bezieht sich zum einen auf den Wandel der Form und eine reaktive Umgestaltung (KOREN ET AL. 1999, WIENDAHL 2002, BENKAMOUN 2016, S. 57), z. B. eines Fabriklayouts oder einer Arbeitsstation, zum anderen auf eine zu aktivierende Einsatzbereitschaft auf der Maschinenebene (z. B. neue Konfiguration einer Werkzeugmaschine durch eine zusätzliche Bewegungsachse) im Falle eines Wandels (WIENDAHL 2002). *Agilität* wird gemeinhin als Fähigkeit betrachtet, einen Wandel schnell bewältigen zu können (FRICKE & SCHULZ 2005, RYAN ET AL. 2013). Ansätze des agilen Projektmanagements (z. B. Scrum) sehen daher nur ein Mindestmaß an Planungstätigkeit und iterativ zu durchlaufende Prozessschleifen vor (ELLIS 2016, S. 224-229), um auch in der Phase der Planung ohne Verzögerung auf Veränderungstreiber reagieren zu können. *Flexibilität* ist eine Veränderungsstrategie, die durch die vorgehaltenen Aktionskorridore (siehe Kap. 2.1.3) eine möglichst einfache Anpassung von Fabrikstrukturen ermöglicht (REINHART 1997, WIENDAHL 2002, FRICKE & SCHULZ 2005, RYAN ET AL. 2013). *Wandlungsfähigkeit* erzeugt eine Einsatzbereitschaft der Fabrik für den Wandel, die auf einer Aktivierung des Wandlungspotenzials beruht, womit die ursprünglichen Funktionen erweitert bzw. Aktionskorridore verschoben werden können (REINHART 1997, WIENDAHL 2002, PLEHN ET AL. 2015A). *Adaptierbarkeit* kann nach PLEHN ET AL. (2015A) definiert werden als Fähigkeit eines Systems, seine Eigenschaften und Funktionen in einem vorbestimmten Rahmen autonom an geänderte Umgebungsbedingungen anzupassen.

3.4.3 Veränderungsbefähiger

Veränderungsbefähiger (VBF) können durch die Zuordnung zu Fabrikobjekten zur Operationalisierung der Veränderungsstrategie verwendet werden (siehe Kap. 2.1.3). Die Anzahl und Benennung der Befähiger variiert je nach Quelle. Im Folgenden werden daher ein

Überblick sowie eine kurze Erläuterung zu jedem VBF gegeben. Die Arbeit von HERNÁNDEZ MORALES (2003) kann als erster großer Meilenstein bei der Beforschung von VBF angesehen werden. Er differenziert zwischen *Mobilität, Erweiter- und Reduzierbarkeit, Modularität, Funktions- und Nutzungsneutralität, Vernetzungsfähigkeit* sowie *Desintegrations- und Integrationsfähigkeit*. Mehrere spätere Arbeiten, darunter HEGER (2007, S. 78-79), NYHUIS ET AL. (2007), WIENDAHL ET AL. (2007) und RÖSIÖ (2012, S. 24) bauen auf diesen VBF auf. U. a. durch WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES (2006) erfolgt eine Reduzierung der ursprünglich sechs VBF auf fünf, wobei auch die Bezeichnungen angepasst werden (siehe auch HAWER ET AL. 2016B). In Tabelle 3.3 werden die Befähiger erläutert und deren alternative Bezeichnungen gegenübergestellt.

Tabelle 3.3: Übersicht und Beschreibung der Veränderungsbefähiger (i. A. a. HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 54-56).

VBF Bezeichnung	Alternative Bez.	Beschreibung
Mobilität		Änderung der räumlichen Position eines Fabrikobjekts mit geringem Aufwand möglich, die Funktion ist standortunabhängig gewährleistet
Skalierbarkeit	Erweiter- und Reduzierbarkeit	Fabrikobjekt ist „atmungsfähig“, d.h. es kann mit geringem Aufwand beispielsweise in seiner Kapazität oder räumlichen Ausdehnung wachsen oder schrumpfen
Modularität		Untergliederung der Fabrikstruktur bzw. -objekte in standardisierte, vorgeprüfte und autonome Elemente mit geringer Kopplung
Universalität	Funktions- und Nutzungsneutralität	Fähigkeit der Fabrikobjekte, für unterschiedliche Anforderungen, Aufgaben und Funktionen ohne Leistungsminderung einsetzbar zu sein
Kompatibilität	Vernetzungsfähigkeit	Ermöglicht vielfältigen und effizienten Personal-, Informations-, Medien- und Materialfluss innerhalb und außerhalb der Fabrikhalle
	Desintegrations- und Integrationsfähigkeit	Produkte, Komponenten, Prozesse oder Betriebsmittel können durch einheitliche Schnittstellen mit geringem Aufwand in die Produktion ein- und ausgegliedert werden
Standardisierung		Vereinheitlichung von Maßen, Schnittstellen, Prozessen, Komponenten, etc.

HEGER (2007, S. 78-79) ergänzt die Standardisierung, die jedoch als unterstützender VBF im Zusammenspiel mit anderen VBF angesehen werden kann. Beispielsweise gehen *Standardisierung* und *Modularität* Hand in Hand, da Module auf einer Vereinheitlichung basieren. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Arbeit anstelle zweier separater nur ein VBF *Modularität und Standardisierung* verwendet.

FRICKE & SCHULZ (2005) schlagen außerdem *Einfachheit* als weiteren VBF vor, dessen Grundidee eine möglichst simple Gestaltung von Fabrikobjekten ist. Da *Einfachheit* jedoch ein prinzipieller Gestaltungsgrundsatz zur effizienten Umsetzung von Veränderungen ist, der aufgrund der durch die Veränderungstreiber hervorgerufenen Komplexität eines Produktionssystems meist nicht umsetzbar ist, wird *Einfachheit* im Verlauf dieser Arbeit nur indirekt als VBF berücksichtigt.

3.4.4 Veränderungstreiber

Ähnlich wie bei den Veränderungsbefähigern ist auch bei den Veränderungstreibern eine große quellenabhängige Varianz festzustellen, die sich sowohl auf die Lokalisierung als auch auf deren Abstraktionsniveau bezieht. So werden von verschiedenen Autoren sowohl unternehmensinterne als auch -externe Faktoren als Veränderungstreiber genannt (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 119, KOCH 2011, S. 35). Als Veränderungstreiber der hier entwickelten Ontologie der Veränderungsfähigkeit werden jedoch ausschließlich Entwicklungen des globalen Unternehmensumfeldes herangezogen, die nicht vom Unternehmen selbst beeinflusst werden können (externe Treiber). Nach DÖRRER (2000, S. 10) muss sich das Unternehmen und damit auch die Fabrikstruktur an die Anforderungen des Marktes bzw. der Kunden bzgl. nachgefragter Produkte, deren Individualisierung sowie den politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen anpassen und auf diese reagieren oder auf Basis von Vorhersagen proaktiv handeln. Die aufgeführten Veränderungstreiber sind daher als Tendenzen, Trends oder, wie im Rezeptormodell von CISEK ET AL. (2002), als externe Turbulenztreiber anzusehen, deren Auswirkungen von den Rezeptoren der Produktion aufgenommen und kanalisiert werden. Diese Auswirkungen verursachen unternehmensintern unscharfe Planungsdaten. Im Folgenden werden die in der Ontologie aufgeführten Veränderungstreiber erläutert.

Die Globalisierung führte in den vergangenen Jahrzehnten vor allem zu einem komplexen Wirkungsgefüge (WIENDAHL 2002) und Abhängigkeiten der Märkte (CISEK ET AL. 2002), die

mit einer zunehmenden Volatilität, beispielsweise bei Rohstoffpreisen, Wechselkursen, Güternachfrage etc., einhergeht (WIENDAHL ET AL. 2007). Der gesellschaftliche Wandel (MÖLLER 2008, S. 25) erzeugt veränderte Kundenanforderungen, wie beispielsweise eine zunehmende Nachfrage nach individualisierten Produkten, die eine steigende Variantenzahl und sinkende Stückzahlen pro Variante zufolge hat (CISEK ET AL. 2002, WIENDAHL ET AL. 2007, KOCH 2011, S. 2). Ein rascher technologischer Fortschritt (WIENDAHL 2002, HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 163) führt zusammen mit der steigenden Variantenzahl zu kürzer werdenden Innovations- und Produktlebenszyklen (MÖLLER 2008, S. 25, LÖFFLER 2011, S. 29, KOCH 2011, S. 35). Auch die Risiken durch Aktivitäten der Wettbewerber gehören zu den Veränderungstreibern (WIENDAHL 2002, LÖFFLER 2011, S. 29). Politische Verhältnisse, z. B. die Sicherheitslage in einem Staat, und die Gesetzgebung, z. B. Emissionsgesetze für PKW, beeinflussen die Produktion nachhaltig (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 163, MÖLLER 2008, S. 25, KOCH 2011, S. 35). Nicht zuletzt sind auch unvorhersehbare singuläre Ereignisse wie beispielsweise Naturkatastrophen, handelspolitische und finanzwirtschaftliche Krisen und plötzliche politische Umbrüche bedeutende Veränderungstreiber, die Vorhersagen und Prognosen zunehmend erschweren (CISEK ET AL. 2002, WIENDAHL 2002, LERCH ET AL. 2017).

3.5 Defizite vorhandener Methoden

Der präsentierte Stand der Forschung weist mehrere Defizite auf, die im Folgenden detailliert werden.

In einigen der vorgestellten Ansätze werden Veränderungstreiber zwar betrachtet und deren zukünftige Ausprägungen variiert, um Szenarien zu bilden. Die Auswirkungen dieser Veränderungstreiber auf Planungsdaten und die durch die Weiterverarbeitung im Planungsprozess stattfindende Unschärfefortpflanzung (und damit die Abhängigkeiten der Planungsparameter untereinander) werden bisher jedoch kaum berücksichtigt. Anhand eines Beispiels soll dieser Aspekt verdeutlicht werden: Volatile Absatzmärkte führen zu einer Unschärfe in der Prognose der Nachfragemenge für ein bestimmtes Produkt. Diese unscharfe Prognose verursacht eine Unschärfe in der Berechnung der benötigten Produktionskapazität, die sich wiederum in einer Unschärfe bei der Festlegung der benötigten Anzahl an Betriebsmitteln auswirkt. Da die Anzahl der Betriebsmittel zur Berechnung der benötigten Produktionsfläche verwendet wird, unterliegt diese ebenfalls einer Unschärfe. Die

systematische Berücksichtigung dieser Wirkungskette beim Einbezug der Unschärfe ist in vorhandenen Planungsansätzen nicht gegeben. Damit ist auch eine anforderungsgerechte Ableitung der benötigten Veränderungsfähigkeit, welche die vorhandenen Unschärfen möglichst exakt adressiert, nur schwierig möglich. Eine Überdimensionierung von Veränderungsbefähigern bzw. die Realisierung von Veränderungsfähigkeit „an der falschen Stelle“ und damit stark erhöhte Kosten können die Folge sein.

Auch die Modellierung der identifizierten Unschärfen wird in der Praxis mangels einer einheitlichen, anwendungsgerechten Vorgehensweise, die eine Klassifizierung der Unschärfen und Unsicherheiten erlaubt, oft nicht systematisch durchgeführt.

Des Weiteren werden Wirkbeziehungen zwischen den VBF bisher nicht adäquat berücksichtigt. Somit ist eine effiziente Kombination der VBF zu alternativen Fabrikstrukturvarianten, wie von HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 56) gefordert, nicht möglich. Negative Wirkbeziehungen zwischen VBF können deren gemeinsame Realisierbarkeit erschweren und zu hohen Kosten führen. Positive Wirkbeziehungen hingegen können auf Synergien hinweisen und bieten somit ein Potenzial zur Bildung effizienter und effektiver VBF-Kombinationen zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen.

Ein weiteres Defizit stellt die mangelnde Berücksichtigung der Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit dar. Der Fokus existierender Methoden liegt überwiegend auf jeweils nur einer Veränderungsstrategie. In den meisten Fällen werden z. B. Flexibilität, Wandlungsfähigkeit oder Rekonfigurierbarkeit einer Fabrik unabhängig voneinander ausgeplant. Eine gemeinsame Betrachtung mehrerer Strategien wird jedoch von NYHUIS (2010, S. 24) explizit gefordert. Werden in einer Fabrik eine hohe Flexibilität und damit breite Aktionskorridore vorgehalten, ist die Umsetzung von Veränderungsbefähigern, die Wandlungsfähigkeit fördern, nur in einem geringeren Maße nötig. Andersherum wird Wandlungsfähigkeit zu einer essenziellen Größe, wenn die Fabrikstrukturen eine geringe Flexibilität und damit sehr schmale Aktionskorridore aufweisen (im Sinne einer robusten Planung, siehe Kap. 2.1.3), da diese durch die Wandlungsfähigkeit angepasst werden können.

Zusammenfassend lassen sich vier Handlungsfelder aus den aufgeführten Defiziten ableiten:

1. Systematische Analyse der in einem Fabrikplanungsprojekt vorhandenen unscharfen Daten unter Berücksichtigung von Unschärfefortpflanzung.

2. Ableitung der benötigten Veränderungsfähigkeit aus der vorhandenen Unschärfe.
3. Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen den für die Operationalisierung der Veränderungsfähigkeiten eingesetzten VBF.
4. Einbezug unterschiedlicher Veränderungsstrategien (Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Robustheit) in die Entscheidungsfindung für eine optimale Fabrikstrukturvariante.

Die identifizierten Defizite und die aufgeführten Handlungsfelder werden im folgenden Kap. 4 in Anforderungen an die zu entwickelnde Methode überführt.

4 Anforderungen an die Methode und Forschungsfragen

Auf den im letzten Abschnitt identifizierten Defiziten aufbauend, werden in diesem Kapitel inhaltliche sowie anwendungsbezogene Anforderungen formuliert und Forschungsfragen, die durch diese Arbeit zu beantworten sind, abgeleitet.

4.1 Inhaltliche Anforderungen

Inhaltliche Anforderungen beziehen sich auf die erforderlichen Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden Methode.

- *Modellierung individueller Planungsprozesse:* Da jedes Unternehmen einem, zumindest in Teilen, individuellen Fabrikplanungsprozess folgt (wie die Ergebnisse der ersten Interviewreihe zeigen, siehe Kap. 5.2 und Anhang C), ist ein Ansatz bereitzustellen, der die Modellierung individuell unterschiedlicher Planungsprozesse erlaubt und die relevanten Planungsparameter in die Modellierung einbezieht.
- *Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Planungsparametern:* Mithilfe eines Modells des individuellen Planungsprozesses soll es möglich sein, Abhängigkeiten zwischen den Planungsparametern zu dokumentieren und visuell darzustellen.
- *Einbezug von Unschärfen und deren Fortpflanzung:* Eine Methode zur Klassifizierung und Identifikation geeigneter Modellierungsformen für die Unschärfe eines jeden relevanten Planungsparameters ist zu entwickeln. Die Fortpflanzung der Unschärfe soll unter Verwendung des Planungsprozessmodells analysiert werden, um auch Unschärfen sog. abhängiger Planungsparameter bestimmen zu können.
- *Unschärfebasierte Auswahl von VBF:* Basierend auf den identifizierten Unschärfen sollen genau die Veränderungsbefähiger ausgewählt werden können, die besonders gut für eine Kompensation der Unschärfe geeignet sind. Eine Überdimensionierung der Fabrikstrukturen ist im Sinne der Kosteneffizienz so gering wie möglich zu gestalten.

- *Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen VBF:* Bei der Auswahl einer Menge an VBF zur Bildung sog. VBF-Kombinationen sind die Wirkbeziehungen zwischen einzelnen VBF zu berücksichtigen. Diese sind durch eine geeignete methodische Vorgehensweise zunächst zu identifizieren.
- *Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit:* Bei der Gestaltung veränderungsfähiger Fabrikstrukturvarianten durch die Auswahl und Kombination von VBF sind, zumindest implizit[40], Robustheit, Flexibilität und Wandlungsfähigkeit als mögliche Veränderungsstrategien vorzusehen.

4.2 Anwendungsbezogene Anforderungen

Anwendungsbezogene Anforderungen beziehen sich auf den Aufwand und andere Eigenschaften der zu entwickelnden Methode in der praktischen Anwendung.

- *Adaptierbarkeit durch Modularität:* Die Methode soll in einer Weise aufgebaut werden, welche die Anwendung einzelner Schritte ermöglicht, ohne dass alle anderen Schritte ebenfalls durchgeführt werden müssen. Die Schritte können somit als Module aufgefasst werden, die eine Adaptierbarkeit der Methode an die Anforderungen und Strukturen unterschiedlicher Unternehmen und Abteilungen erlauben.
- *Effizienz der Anwendung:* Der durch die Methode erzeugte langfristige Nutzen für das Unternehmen muss den Aufwand der Anwendung übersteigen. Zur Reduzierung des Anwendungsaufwands sind spezielle Werkzeuge (z. B. Softwareprogramme) zu entwickeln und zu erproben.
- *Akzeptanz durch Partizipationsmöglichkeiten:* Eine angemessene Partizipation der Planungsbeteiligten an dem Prozess zur Generierung der Ergebnisse wird angestrebt, um die Transparenz der Methode und damit deren Akzeptanz sicherzustellen.

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die formulierten Anforderungen nicht disjunkt sind, sich also gegenseitig bedingen können. Beispielsweise kann die *Adaptierbarkeit durch Modularität* der Methode deren *Effizienz in der Anwendung* verbessern.

[40] „Implizit“ meint, dass der Anwender nicht über ein tieferes Verständnis der Begrifflichkeiten und der Abgrenzung der drei genannten Veränderungsstrategien verfügen muss, so lange er durch die Anwendung der Methode die Prinzipien dieser Strategien in seinem Handeln (z. B. bei der Auswahl und Auslegung von VBF) gezielt verfolgt.

In Tabelle 4.1 sind alle neun formulierten Anforderungen zusammenfassend dargestellt. Diese werden in Kap. 6.4 für die Bewertung der entwickelten Methode herangezogen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Anforderungen an die Methode.

Inhaltliche Anforderungen	
A1.1	Modellierung individueller Planungsprozesse
A1.2	Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Planungsparametern
A1.3	Einbezug von Unschärfen und deren Fortpflanzung
A1.4	Unschärfebasierte Auswahl von VBF
A1.5	Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen VBF
A1.6	Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit
Anwendungsbezogene Anforderungen	
A2.1	Adaptierbarkeit durch Modularität
A2.2	Effizienz der Anwendung
A2.3	Akzeptanz durch Partizipationsmöglichkeiten

4.3 Forschungsfragen

Die in Kap. 4.1 und 4.2 formulierten Anforderungen werden in diesem Kapitel in Forschungsfragen überführt, die es im Rahmen der vorliegenden Ausarbeitung zu beantworten gilt (Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Forschungsfragen.

Forschungsfragen		**zugrundeliegende Anforderung**
F1	Wie können die Auswirkungen unscharfer Daten im Fabrikplanungsprozess analysiert werden?	A1.1, A1.2
F2	Wie lässt sich die Unschärfe der Daten bzw. Parameter anwendungsorientiert klassifizieren und modellieren?	A1.3
F3	Wie können die für die Kompensation vorhandener Unschärfen geeigneten VBF identifiziert werden?	A1.4, A1.6
F4	Wie lassen sich VBF unter Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zu einer Fabrikstrukturvariante kombinieren?	A1.5, A1.6

Forschungsfrage F1 bezieht sich auf die Verarbeitung von Daten im Prozess der Fabrikplanung, die aufgrund der Veränderungstreiber einer Unschärfe unterliegen. Es soll eine Antwort darauf gegeben werden, wie die Auswirkungen von Unschärfen verschiedener Eingangsparameter auf die unmittelbar im Prozessschritt der Strukturplanung benötigten abhängigen Ausgangsparameter analysiert werden können. Dabei sind die Abhängigkeiten, die zwischen den Planungsparametern bestehen, zu identifizieren und in geeigneter Weise zu quantifizieren.

Mit der Beantwortung von Forschungsfrage F2 ist das Ziel verbunden, eine anwendungsorientierte Teilmethode zur Klassifizierung von Unschärfen und der Identifikation geeigneter Modellierungsformen zu entwickeln. Diese Modellierungsformen können beispielsweise Wahrscheinlichkeitsverteilungen oder Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen sein. Die Teilmethode sollte so konzipiert sein, dass auch Anwender ohne Expertenwissen im Bereich Statistik und Wahrscheinlichkeits- bzw. Fuzzy-Set-Theorie eine effiziente und valide Modellierung der vorhandenen Unschärfen vornehmen können. Weiterhin ist zu untersuchen, wie die Unschärfen unterschiedlicher Daten (z. B. Zeitreihen, Stichproben, Messungen, Schätzwerte) sinnvoll klassifiziert werden können.

Forschungsfrage F3 bezieht sich auf die Entwicklung eines Verfahrens, mit dessen Hilfe genau die VBF bestimmt werden können, die für die Kompensation der vorhandenen und entsprechend modellierten Unschärfen geeignet sind. Dabei ist zunächst eine allgemeingültige Erhebung durchzuführen, welche VBF in der industriellen Praxis sowie in der Literatur relevant sind (Interviewreihe 1, siehe Anhang C und K). Außerdem soll eine Untersuchung erfolgen, welche VBF allgemein für die Kompensation häufig auftretender und damit in der fabrikplanerischen Praxis typischer Unschärfen eingesetzt werden können (Onlineumfrage, siehe Anhang D und E). Die Ergebnisse sind in strukturierter Form zu dokumentieren.

Die Beantwortung von Forschungsfrage F4 zielt auf die Kombination von VBF zu alternativen Fabrikstrukturvarianten unter Berücksichtigung der zwischen diesen bestehenden Wirkbeziehungen ab. Zu diesem Zweck sind zunächst die Wirkbeziehungen zwischen den VBF im Rahmen einer weiteren Erhebung (Interviewreihe 2, siehe Kap. 5.6.1, Abb. 5.16) zu identifizieren. Im Rahmen der Bearbeitung von Forschungsfrage F4 ist ein Verfahren zu konzipieren, das eine Einflussanalyse der VBF ermöglicht, deren Ergebnisse in die Teilmethode zur Bildung alternativer VBF-Kombinationen einbezogen werden können.

5 Methode zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen

In diesem Kapitel wird zunächst ein Überblick über den Ablauf der entwickelten Methode gegeben (Kap. 5.1) und deren einzelne Schritte werden in den folgenden Kapiteln 5.2 bis 5.7 detailliert. Zur Abgrenzung von empirisch-induktiven und analytisch-deduktiven Abschnitten dieser Arbeit sind die empirisch-induktiven Teile, in denen beispielsweise Experteninterviews oder Befragungen zur Erhebung allgemeingültiger Informationen durchgeführt werden, entsprechend gekennzeichnet.

5.1 Vorgehensmodell der Methode – ein Überblick

Ziel dieses Kapitels ist es, einen Überblick über den Ablauf der entwickelten Methode zu geben und den Aufbau der folgenden Kapitel (dem Hauptteil dieser Arbeit) zu strukturieren. Zu diesem Zweck wird das in Abb. 5.1 dargestellte ganzheitliche Vorgehensmodell der entwickelten Methode herangezogen.

Im ersten Schritt (Kap. 5.2) wird zunächst der unternehmensspezifische Planungsprozess modelliert. Dabei werden methodische Grundlagen des Condition Based Factory Planning nach SCHUH ET AL. (2011) (siehe auch Kap. 3.1.2) und der sog. SIPOC[41]-Logik angewendet, um eine Dokumentation und Modellierung des Planungsprozesses unter Einbezug der Planungsdaten und deren Abhängigkeiten zu ermöglichen. Ziel des zweiten Schrittes (Kap. 5.3) ist es, durch Anwendung von Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements zu untersuchen, welche Planungsparameter eine hohe Aktiv- und Passivsumme aufweisen, um Erkenntnisse zu deren Bedeutung und Auswirkungen im Planungsprozess zu erlangen. Außerdem werden Verknüpfungsregeln der Planungsparameter (Rechenvorschriften, Korrelationen, qualitative Wirkbeziehungen) aufgenommen. Im dritten Schritt (Kap. 5.4) werden die relevanten Unschärfen der Planungsparameter modelliert und klassifiziert.

[41] Eine Erläuterung der SIPOC-Logik wird in Kap. 5.2 gegeben.

Die Unschärfe abhängiger Planungsparameter wird unter Einbezug der jeweiligen Einflussfaktoren durch die Anwendung von Unschärfefortpflanzungsmechanismen (Gauß'sche Fehlerfortpflanzung, Monte-Carlo-Simulation, Fuzzy-Inferenz) bestimmt. Der dritte Schritt schließt mit einer Handlungsempfehlung bzgl. der Reduktion und Quantifizierung von Unschärfen ab.

		Schritte	Kapitel	Inhalte	Methodische Grundlagen
Analyse der Unschärfen	1	**Modellierung Planungsprozess**	5.2.	Dokumentation & Modellierung spezifischer Planungsprozesse	SIPOC*, CBFP**, Strukturelles Komplexitätsmgmt.
	2	**Modellierung von Unschärfen u. deren Wirkbeziehungen**	5.3.1 5.3.2	Klassifizierung und Modellierung der Unschärfen Identifikation relevanter Wirkbeziehungen	Wahrscheinlichkeitstheorie, Fuzzy Set Theorie, Intervallstatistik
	3	**Unschärfefortpflanzungsanalyse**	5.4.1 5.4.2	Bestimmung der Unschärfe abhängiger Planungsparameter Ableitung unschärfebezogener Handlungsempfehlungen	Fehlerfortpflanzung, Monte-Carlo Simulation, Fuzzy Inferenz, Portfoliotechnik
Planung der Veränderungsfähigkeit	4	**VBF-Auswahl und Dimensionierung**	5.5.1 5.5.2	Vorauswahl realisierbarer VBF Unschärfebasierte Dimensionierung der relevanten VBF	
	5	**VBF-Kombination**	5.6.1 5.6.2	Einflussanalyse der VBF Kombination von VBF zu alternativen Fabrikstrukturvarianten	Strukturelles Komplexitätsmgmt., Fuzzy Cognitive Maps
	6	**Bewertung und Entscheidungshilfe**	5.7.1 5.7.2	Bewertung der Fabrikstrukturvarianten Zuordnung der Fabrikstrukturvarianten zu Veränderungsstrategien	Kapitalwertmethode

*SIPOC: Supplier-Input-Process-Output-Customer, **CBFP: Condition Based Factory Planning

Abb. 5.1: Vorgehensmodell der Methode.

Die Ergebnisse aus den ersten drei Schritten werden im Schritt 4 (Kap. 5.5) aufgegriffen, um auf Basis der modellierten Unschärfen Veränderungsbefähiger zu identifizieren, die besonders geeignet sind, um die vorhandenen Unschärfen zu kompensieren. Weiterhin werden diese VBF in ihrer Ausprägung dimensioniert. Schritt 5 (Kap. 5.6) verfolgt das Ziel, auf Basis des Wirkungsgefüges der VBF, das mithilfe einer Fuzzy Cognititve Map dokumentiert

wird, sinnvolle Kombinationen von Veränderungsbefähigern zu generieren. Die unterschiedlichen Kombinationen bilden alternative Fabrikstrukturvarianten, die in Schritt 6 (Kap. 5.7) bewertet werden. Dazu werden zunächst die mit jeder Variante verbundenen Investitions- sowie Betriebs- und Umbaukosten erhoben. Auf Basis einer angepassten Kapitalwertmethode, die sowohl die Unschärfen der monetären Einflussgrößen als auch eine Reihe qualitativer Faktoren berücksichtigt, werden die Fabrikstrukturvarianten bewertet und eine begründete Empfehlung ausgesprochen. Außerdem wird eine Zuordnung der jeweiligen Variante zu einer oder mehreren Veränderungsstrategien vorgenommen, um sowohl eine monetäre als auch eine veränderungsstrategische Entscheidungshilfe zur Auswahl einer Variante bereitzustellen.

Während die ersten beiden Schritte der Methode eine einmalige Analyse des unternehmensspezifischen Planungsprozesses darstellen, bei der, sofern erforderlich, nur die Modellierung der Unschärfen planungsfallspezifisch und damit wiederkehrend erfolgt, sind die Schritte 3 bis 6 für jeden Planungsfall erneut durchzuführen und somit als iterativer, kontinuierlicher Planungsprozess zu verstehen. Die Schritte 1 bis 2 hingegen stellen einen zu betreibenden Initialaufwand zur sachgerechten Durchführung der darauf aufbauenden wiederkehrenden Schritte dar.

5.2 Schritt 1: Modellierung und Analyse des Planungsprozesses

Als Grundlage für die Planung der Veränderungsfähigkeit einer Fabrik wird in diesem Kapitel ein Modellierungsansatz erarbeitet, der eine Analyse unternehmensspezifischer Planungsprozesse erlaubt. Dabei werden die im Planungsprozess relevanten Parameter sowie deren Wirkbeziehungen in den Fokus gestellt. Mithilfe des entwickelten Modellierungsansatzes für spezifische Planungsprozesse werden unter Anwendung von Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements die Aktiv- und Passivsumme der verschiedenen Planungsparameter bestimmt und auf diese Weise eine Aussage über deren Einbindung in das Gesamtsystem des Fabrikplanungsprozesses getroffen.

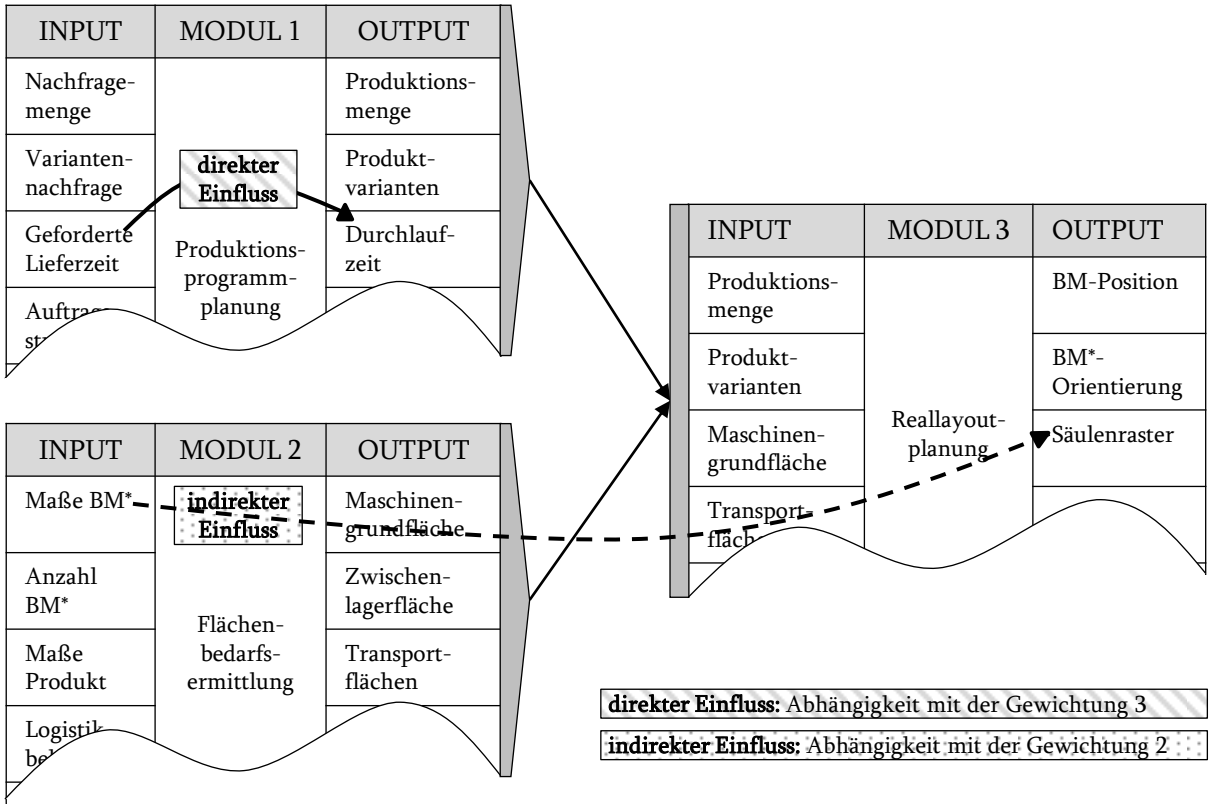
„Planungsphasen enthalten definierte Planungsinhalte, wobei im Regelfall die nachfolgende Planungsphase auf den Ergebnissen der vorauslaufenden Planungsphase aufbaut“ (GRUNDIG 2009, S. 37). Dass dieser Sachverhalt auch in der industriellen Praxis gilt, wurde im Rahmen der 17 semi-standardisierten leitfadenbasierten Experteninterviews (1. Interviewreihe, siehe Kap. 1.4 und Anhang C) mit Kompetenzträgern aus dem Bereich der Fa-

brikplanung bestätigt. Dabei wurde jedoch auch deutlich, dass nicht nur in der Literatur (wie in Abb. 3.1 dargestellt) unterschiedliche Planungsphasen und deren Verknüpfungen existieren. Auch in der Praxis sind die Vorgehensweisen zur Planung von Fabriken oft unternehmensspezifisch. Es gilt daher, eine Teilmethode zu entwickeln, welche die Dokumentation und Analyse unternehmensspezifischer Planungsprozesse unter Berücksichtigung der Planungsparameter und deren Abhängigkeiten ermöglicht. Zu diesem Zweck werden, auf der Grundidee des Condition Based Factory Planning (SCHUH ET AL. 2011) aufbauend, einzelne Planungsschritte als Module modelliert, die jeweils bestimmte Eingangsparameter benötigen, diese verarbeiten und die Ergebnisse in Form von Ausgangsparametern wieder ausgeben.

Beispielsweise kann der Planungsschritt Flächenbedarfsermittlung als ein Modul aufgefasst werden, wie in Abb. 5.2 (Modul 2) beispielhaft dargestellt. Ein Eingangsparameter dieses Moduls ist die Anzahl der Betriebsmittel (BM), auf deren Basis im Rahmen der Flächenbedarfsermittlung z. B. der Ausgangsparameter Maschinengrundfläche errechnet wird. Ist ein Ausgangsparameter eines Moduls gleichzeitig Eingangsparameter eines anderen Moduls, so besteht zwischen diesen Modulen eine Beziehung, die, wie in Abb. 5.2 dargestellt, durch einen Pfeil visualisiert wird. Dieser bezieht sich immer auf die Verbindung der Module, nicht einzelner Planungsparameter.

Die Dokumentation des Planungsprozesses folgt der SIPOC-Logik.[42] Es werden demnach die Lieferanten der Daten (Supplier), die Eingangsdaten (Input) bereitstellen, ermittelt, dem jeweiligen Planungsschritt (Process) zugeordnet und die Ausgangsparameter (Output) festgehalten. Der unternehmensinterne Kunde (Customer) ist die Abteilung, die diese Ausgangsparameter benötigt und weiterverarbeitet. Da sich in der Praxis gezeigt hat, dass die Verantwortlichkeiten erheblich häufiger wechseln, als der Planungsprozess und die Prozessschritte verändert werden, sind in der entwickelten Modellierungsweise nur die Ein- und Ausgangsparameter sowie die Bezeichnung des jeweiligen Prozessschrittes aufzunehmen. Damit können häufige Änderungen des Prozessmodells vermieden und der Pflegeaufwand begrenzt werden.

[42] SIPOC (Supplier-Input-Process-Output-Customer) ist eine Modellierungssystematik aus dem Bereich des Six-Sigma-Ansatzes, die eine Modellierung von Planungsprozessen unterstützt (LIEBETRUTH 2016, S. 30-31).



DSM**

	Planungsparameter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	…	n	Aktiv-summe
1	Nachfragemenge			3										2					5
2	Variantennachfrage			3	3									2					8
3	Produktionsmenge								3					3	3				9
4	Produktvarianten													3					3
5	Geforderte Lieferzeit						3												3
6	Durchlaufzeit																		0
7	Maße BM*										3			2	2	2			9
8	Anzahl BM*										3								3
9	Maße Produkt											3	3	2		2			10
10	Maschinengrundfläche													3	3	3			9
11	Zwischenlagerfläche															3			3
12	Transportflächen													3		3			6
13	BM*-Position																		0
14	BM*-Orientierung																		0
15	Säulenraster																		0
…	…																		0
n																			0
	Passivsumme	0	0	3	3	0	3	0	3	0	6	3	3	10	8	6	7	0	

*BM: Betriebsmittel; **DSM: Design-Struktur-Matrix

Abb. 5.2: Modellierung eines Planungsprozesses auf Basis der Planungsparameter-Beziehungen und Darstellung der Ergebnisse in einer DSM.

Dieser erste Schritt der Methode wird von Mitarbeitern vorgenommen, die für die Gestaltung und Organisation der unternehmensinternen Prozesse verantwortlich sind und somit über ein gutes Verständnis des gesamten Fabrikplanungsprozesses verfügen.

In Abb. 5.2 wird das Vorgehen der Modellierung beispielhaft dargestellt: Zunächst werden die einzelnen Phasen bzw. Schritte des Planungsprozesses in sog. Modulen mit deren jeweiligen Input- und Output-Parametern dokumentiert. Sofern innerhalb eines Moduls ein Input-Parameter zur Ermittlung eines Output-Parameters unmittelbar verwendet wird, kann dies als direkter Einfluss modelliert werden. Dieser wird in der in Abb. 5.2 dargestellten DSM mit der Stärke 3 gewichtet.

Ein Beispiel für einen direkten Einfluss ist die Ableitung der benötigten Durchlaufzeit in der Produktion von der durch den Kunden geforderten Lieferzeit im Modul 1 Produktionsproprammplanung. Der entsprechende Eintrag in der DSM ist in Abb. 5.2 hervorgehoben. Indirekte Einflüsse über zwei Module entstehen, wenn ein Input-Parameter eines Moduls den Output-Parameter eines folgenden Moduls mittelbar beeinflusst. Dies ist am Beispiel der gestrichelten Linie in Abb. 5.2 visualisiert: Die Maße der Betriebsmittel fließen zunächst in die Berechnung der Maschinengrundfläche ein (Modul 2 Flächenbedarfsermittlung). Diese wiederum wird als Input-Parameter des Moduls 3 Reallayoutplanung verwendet, in der u. a. das Säulenrastermaß bestimmt wird. Das Säulenraster hängt also indirekt von den Maßen der Betriebsmittel ab. Indirekte Einflüsse über zwei Module werden mit der Stärke 2 gewichtet. Für das herangezogene Beispiel ist der entsprechende Eintrag in der DSM in Abb. 5.2 hervorgehoben. Einflüsse über drei Module können, mit der Stärke 1 gewichtet, ebenfalls berücksichtigt werden, sind jedoch aufgrund der Übersichtlichkeit in Abb. 5.2 nicht dargestellt.

Ist eine Modellierung der Abhängigkeiten über mehr als drei Schritte (Module) erforderlich, wird der Gewichtungswert für direkte Abhängigkeiten entsprechend erhöht. Werden z. B. fünf Schritte betrachtet, erhöht sich der Gewichtungswert für direkte Abhängigkeiten nach folgendem Schema ebenfalls auf fünf (Tabelle 5.1). Die Anzahl der betrachteten Schritte bestimmt somit die Gewichtungsskala der Abhängigkeiten.

Tabelle 5.1: Gewichtungsskala für Abhängigkeiten bei einer Betrachtung über 5 Prozessschritte (Module).

Gewichtungswert	Anzahl der Schritte, für die Abhängigkeiten bewertet werden
5	1 Schritt (direkte Abhängigkeit innerhalb eines Moduls)
4	2 Schritte (von einem Modul zu einem anderen)
3	3 Schritte (Abhängigkeit über 3 Module)
2	4 Schritte (Abhängigkeit über 4 Module)
1	5 Schritte (Abhängigkeit über 5 Module)

Um eine korrekte Überführung aller Parameterbeziehungen aus dem modularen Planungsprozess in eine DSM zu ermöglichen, sind außerdem die Abhängigkeiten innerhalb eines Moduls zu dokumentieren, da nicht jeder Output-Parameter von jedem Inputparameter eines Moduls beeinflusst wird. Beispielsweise wird in dem Planungsschritt Produktionsprogrammplanung (Modul 1 in Abb. 5.2) der Output-Parameter Produktionsmenge durch die prognostizierte Nachfragemenge und die Variantennachfrage determiniert, jedoch nicht durch die geforderte Lieferzeit. Zu diesem Zweck wird eine einfache Liste[43] verwendet, die Ein- und Ausgangsparameter gegenüberstellt (siehe Abb. 5.3), sofern eine direkte Abhängigkeit vorhanden ist. Die Nummerierung der Parameter ist der DSM in Abb. 5.2 entnommen.

Modul	Nr. in DSM	Eingangsparameter	Ausgangsparameter	Nr. in DSM
1	1	Nachfragemenge	Produktionsmenge	3
	2	Variantennachfrage	Produktionsmenge	3
	2	Variantennachfrage	Produktvarianten	4
	5	Geforderte Lieferzeit	Durchlaufzeit	6
2	7	Maße BM*	Maschinengrundfläche	10
	8	Anzahl BM*	Maschinengrundfläche	10
	9	Maße Produkt	Transportflächen	12

Abb. 5.3: Liste der Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangsparametern innerhalb der Planungsmodule.

Dabei kann ein Eingangsparameter mehrere Ausgangsparameter beeinflussen (in Abb. 5.3 z. B. Variantennachfrage) und ein Ausgangsparameter durch unterschiedliche Eingangsparameter beeinflusst werden (in Abb. 5.3 z. B. Maschinengrundfläche). Die erste Spalte zeigt

[43] Eine Liste dieser Form kann von der in Kap. 6.2 vorgestellten Software *aranea* automatisiert eingelesen werden.

die Zugehörigkeit zu den Modulen bzw. Planungsschritten, wie durch die Modellierung vorgegeben, an. Die Ziffern in den Folgespalten entsprechen den laufenden Nummern der Planungsparameter aus der in Abb. 5.2 dargestellten DSM.

Mit der Modellierung des unternehmensspezifischen Fabrikplanungsprozesses und der Dokumentation der Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Planungsparametern in der DSM können, wie in Abb. 5.2 dargestellt, die Aktiv- und Passivsumme jedes Parameters berechnet werden. Diese Kennzahlen werden in Schritt 3 der Methode zur Ableitung unschärfebezogener Handlungsempfehlungen benötigt (Kap. 5.4.2).

Zusammenfassend führt die in diesem Kapitel beschriebene Teilmethode zur Dokumentation und Modellierung unternehmensspezifischer Planungsprozesse zu folgenden Ergebnissen:

- Eine Methode zur Dokumentation der Phasen- bzw. Schrittabfolge des Planungsprozesses sowie deren jeweilige Input- und Output-Parameter und damit aller im Fabrikplanungsprozess relevanten Planungsdaten ist vorhanden.
- Die Abhängigkeiten der Planungsschritte (Module) untereinander können modelliert werden.
- Die Abhängigkeiten der Planungsparameter innerhalb der Module können modelliert werden.
- Die Aktivsumme und Passivsumme jedes einzelnen Planungsparameters sind bestimmbar.

5.3 Schritt 2: Modellierung von Unschärfen und deren Wirkbeziehungen

Nachdem in Schritt 1 der Methode eine Analyse des Planungsprozesses und des Wirkungsgefüges der Planungsparameter erfolgt ist, werden in Schritt 2 die Unschärfen der Planungsparameter näher untersucht. Zu diesem Zweck wird in Kap. 5.3.1 ein Verfahren zur Klassifizierung und Modellierung der Unschärfen vorgestellt und anhand von Beispielen erläutert. In Kap. 5.3.2 werden Arten von Wirkbeziehungen zwischen den unterschiedlichen unscharfen Planungsparametern definiert, die als Grundlage für die in Kap. 5.4 erläuterte Unschärfefortpflanzungsanalyse dienen.

5.3.1 Klassifizierung und Modellierung der Unschärfen

Viele der in der Fabrikplanung verwendeten Planungsparameter unterliegen einer Unschärfe (Aggteleky 1987, S. 59). In diesem Kapitel wird ein praxisorientierter Leitfaden zur Klassifizierung und Modellierung dieser Unschärfen und Unsicherheiten vorgestellt. Dieser basiert auf den in Kap. 2.2.1 erörterten existierenden Klassifizierungsschemata, nutzt jedoch als Hauptklassen die drei großen Theoriebereiche der Fuzzy Sets, der Wahrscheinlichkeitstheorie (deskriptive Statistik) und der Intervalle (induktive Statistik und Zeitreihenanalyse). Jede dieser Hauptklassen umfasst mehrere konkrete Modellierungsansätze (Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen, diskrete/kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen, Zeitreihen etc.). Außerdem werden in dem Leitfaden die Ansätze nach Kröll (2007) und Damodaran (2008) zur Modellierung von Unschärfe zusammengeführt. Die Ausarbeitung von Kröll (2007, S. 106) enthält eine Entscheidungsunterstützung zur Auswahl einer geeigneten Wahrscheinlichkeitsverteilung (WKV) in Abhängigkeit der verfügbaren Daten. Es wird unterschieden, ob ausreichend empirische Daten zur quantitativen Bestimmung einer WKV, beispielsweise mittels Parameterschätzung, vorhanden sind, oder ob aufgrund eines Mangels an empirischen Daten eine WKV qualitativ geschätzt werden muss. Diese Unterscheidung, die ebenfalls von Krebs (2012, S. 68–73) herangezogen wird, findet sich in dem in Abb. 5.4 und Abb. 5.5 präsentierten Leitfaden in den Fragen 2, 17 und 18 wieder.

Damodaran (2008, S. 61) legt den Fokus auf die Auswahl qualitativer WKV und bezieht Informationen wie Symmetrie der Verteilung und Lage der Ausreißer in die Ableitung einer WKV ein. Diese Informationen werden in dem im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Leitfaden aus Abb. 5.4 und 5.5 in den Entscheidungsknoten 30 bis 36 abgefragt. Außerdem wird, wie bei Kröll (2007, S. 106), Damodaran (2008, S. 61) sowie auch bei Möller (2008, S. 118–123) und Krebs (2012, S. 68–73) zwischen diskreten und kontinuierlichen Verteilungen unterschieden (Entscheidungsknoten 22 bis 25).

Die Anwendung des Leitfadens erfolgt in mehreren Schritten: Zunächst wird ein Planungsparameter, dessen Unschärfe untersucht werden soll, als sog. Referenzobjekt (in Abb. 5.4: RO) ausgewählt. Für diesen Parameter werden anschließend, beginnend bei *Start,* die Fragen im Leitfaden sukzessive mit *ja (j)* oder *nein (n)* beantwortet. Dadurch entsteht ein Pfad durch das Diagramm, der zur Klassifizierung der Unschärfe dient und an dessen Ende ein Modellierungsansatz für die Unschärfe des fokussierten unscharfen Planungsparameters empfohlen wird.

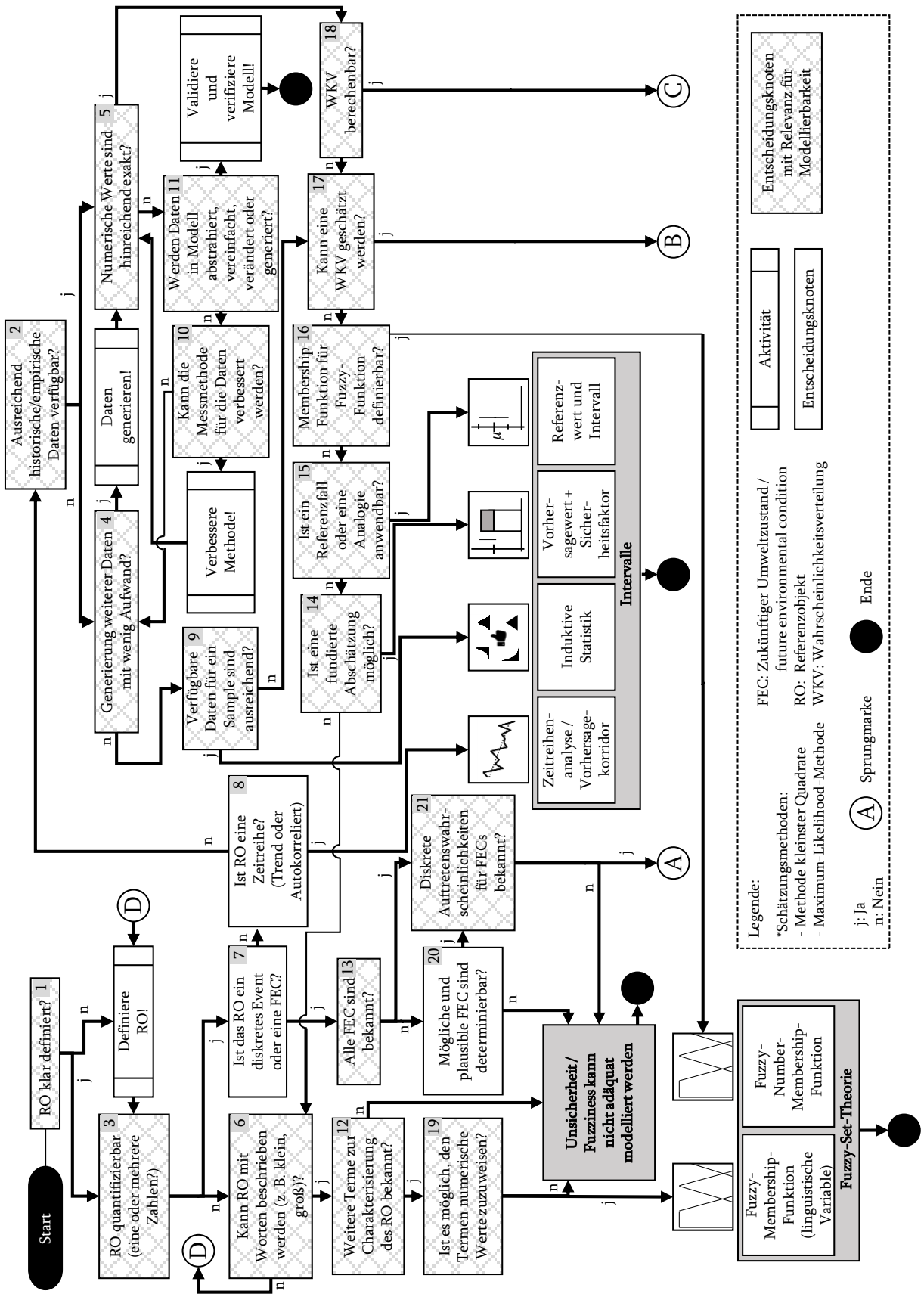


Abb. 5.4: Leitfaden zur Klassifizierung und Modellierung von Unschärfen und Unsicherheiten, Teil 1 (i. A. a. HAWER ET AL. 2018).

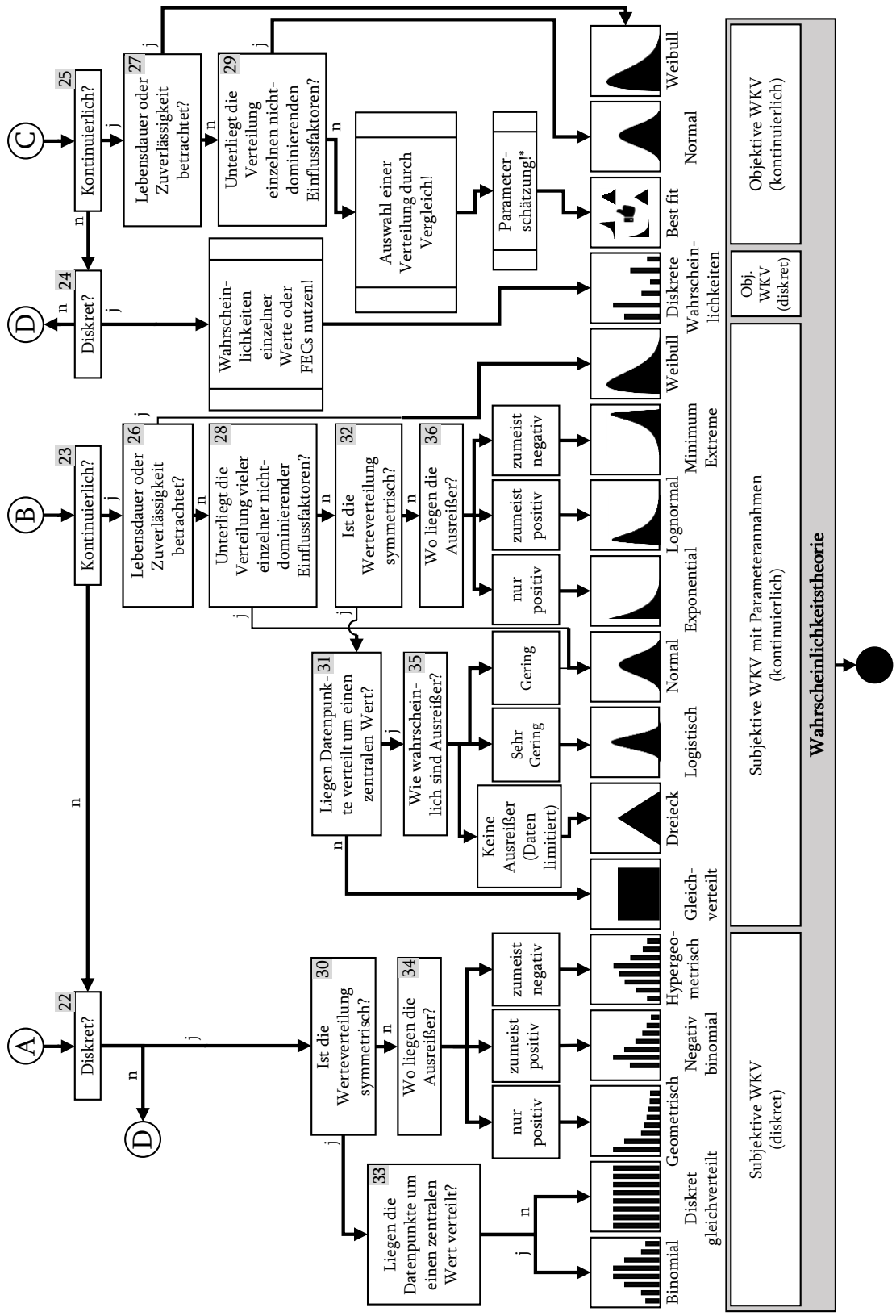


Abb. 5.5: Leitfaden zur Klassifizierung und Modellierung von Unschärfen und Unsicherheiten, Teil 2 (i. A. a. HAWER ET AL. 2018).

Die Klassifizierung erfolgt durch die Zuordnung der Unschärfe zu den Bereichen Fuzzy Sets, Wahrscheinlichkeitstheorie oder Intervalle, die in Abb. 5.4 grau hinterlegt sind. In bestimmten Fällen sind Aktivitäten wie z. B. eine Parameterschätzung durchzuführen. Dieses Vorgehen wird im Folgenden anhand zweier Beispiele mit Bezug auf Abb. 5.4 und 5.5 verdeutlicht:

Beispiel 1: Unscharfer Planungsparameter Absatzmenge

Um die Unschärfe des Referenzobjekts Absatzmenge zu modellieren, wird zunächst die Frage 1 (Ist das Referenzobjekt klar definiert?) beantwortet. Wir gehen davon aus, dass dies der Fall ist und alle Planungsbeteiligten ein gemeinsames Verständnis der Absatzmenge haben. Frage 3 (Ist das Referenzobjekt quantifizierbar?) wird ebenfalls mit *ja* beantwortet, die folgende Frage 7 jedoch mit *nein*, da es sich bei der Absatzmenge nicht um ein diskretes Ereignis handelt, sondern vielmehr um eine Zeitreihe, die einem Trend und Autokorrelation[44] unterliegen kann. Frage 8 ist daher positiv zu beantworten. Die Absatzmenge ist also eine Zeitreihe, deren Unschärfe mithilfe eines Vorhersagekorridors modelliert werden kann. Da dieser Korridor ein Intervall darstellt, ist die Unschärfe der Absatzmenge der Klasse Intervalle zugeordnet.

Beispiel 2: Unscharfer Planungsparameter Mean-Time-To-Repair (MTTR)

Da die MTTR[45] als eine zentrale Kennzahl der Instandhaltung gilt, wird diese in vielen Unternehmen automatisiert aufgenommen. Zur Bestimmung der Unschärfe der MTTR werden daher die Fragen 1 und 3 positiv beantwortet, die Fragen 7 und 8 negativ, da die MTTR zwar als Zeitreihe aufgenommen werden kann, deren Werte jedoch i. d. R. nicht autokorreliert sind. Wir gehen in diesem Beispiel davon aus, dass ausreichend historische Daten der MTTR verfügbar sind, um eine WKV zu bestimmen. Frage 2 wird daher mit *ja* beantwortet. Auch die numerischen Werte, die dokumentiert werden, spiegeln die Realität hinreichend genau wider, Frage 5 ist damit ebenfalls positiv zu beantworten. Da ausreichend empirische Daten verfügbar sind, können die Parameter einer WKV berechnet werden

[44] Als Autokorrelation wird die Eigenschaft von Datenreihen bezeichnet, wenn der Wert eines Datenpunktes abhängig ist von dem Wert eines vorher aufgenommenen Datenpunktes, die Reihe also „mit sich selbst korreliert“ (WINKER 2017, S. 176). Die Datenpunkte von Zeitreihen sind häufig autokorreliert (KREIß & NEUHAUS 2006, S. 21-22, WINKER 2017, S. 176).

[45] In den Richtlinien VDI 3581 und VDI 3423 wird die MTTR beschrieben als Zeitanteil, in dem sich ein Betriebsmittel in einem nicht funktionsfähigen Zustand befindet. Die MTTR ist eine wesentliche Größe zur Kalkulation der technischen Verfügbarkeit.

(Frage 18 wird mit *ja* beantwortet). Weil die MTTR Werte aus dem Bereich der reellen Zahlen annehmen kann, ist die Verteilung kontinuierlich (Frage 25). Es handelt sich nicht um eine Lebensdauer oder Zuverlässigkeitsangabe, die lt. KRÖLL (2007, S. 106) typischerweise als Weibull-Verteilung modelliert wird. Da die MTTR vielen einzelnen, jeweils nicht dominierenden Einflussfaktoren unterliegt, kann ihre Unschärfe über eine Normalverteilung abgebildet werden, deren Parameter auf Basis der vorhandenen empirischen Werte der MTTR berechnet werden können. Die Unschärfe der MTTR ist damit der Klasse Objektive WKV (kontinuierlich) im Bereich der Wahrscheinlichkeitstheorie zugeordnet.

Anhand der beiden angeführten Beispiele wird ersichtlich, dass, je nachdem, welcher Pfad durch das in Abb. 5.4 und 5.5 dargestellte Diagramm entsteht, unterschiedliche Grade der Modellierbarkeit der Unschärfe und Unsicherheit erreicht werden.

Die Unschärfe eines Referenzobjekts, für das weder historische Daten verfügbar sind (Frage 2) noch eine Schätzung der WKV durch Experten möglich ist (Frage 17), ist erheblich schwieriger modellierbar als eine Unschärfe wie im Beispiel der MTTR. Dieser Sachverhalt der unterschiedlichen Grade der Modellierbarkeit kann mithilfe einer einfachen Kennzahl ausgedrückt werden. Jeder der in Abb. 5.4 schraffierten Entscheidungsknoten beinhaltet eine Frage, die für den Grad der Modellierbarkeit M_{RO} eines Referenzobjekts relevant ist. Wird die jeweilige Frage positiv beantwortet, impliziert dies einen Vorteil für die Modellierbarkeit, eine negative Antwort erschwert diese. Daher kann der Quotient aus der Anzahl mit *ja* beantworteter Fragen auf einem Pfad durch die Gesamtanzahl der beantworteten schraffierten Fragen *i* als Grad der Modellierbarkeit M_{RO} einer Parameterunschärfe definiert werden.

$$M_{RO} = \frac{\sum_1^i Antworten_{pos,i}}{\sum_1^i Antworten_{neg,i} + \sum_1^i Antworten_{pos,i}} \tag{5.1}$$

$$mit\ 0 \leq M_{RO} \leq 1$$

M_{RO} ist eine dimensionslose Größe, die lediglich einen Vergleich zweier Unschärfen bzgl. deren Modellierbarkeit, jedoch keine absolute Aussage zulässt. ADAMEK (2016, S. 133) konstatiert: „Das Optimum von Informationen, die wir für ein Zufallsexperiment […] ermitteln können, ist die Kenntnis seiner Wahrscheinlichkeits- bzw. Verteilungsfunktion.“ Dies gilt auch für den optimalen Grad der Modellierbarkeit. Der Fall, dass eine WKV rechnerisch auf Basis einer empirischen Datengrundlage ermittelt werden kann, wie im Beispiel der

MTTR, führt zu einer Beantwortung aller relevanten Fragen mit *ja* und damit zu $M_{RO} = 1$. Ist eine Modellierung der Unschärfe nicht adäquat möglich, sind kleine Werte für M_{RO} die Folge.

Zusammenfassend führt die in diesem Kapitel beschriebene Teilmethode der Klassifizierung und Modellierung von Unschärfen zu folgenden Ergebnissen:

- Für jede Unschärfe eines Planungsparameters ist ein Modellierungsansatz i. S. einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion oder eines Intervalls bestimmt.
- Die durch die Beantwortung der Fragen im Leitfaden erhobenen Informationen bilden die Grundlage für eine genaue Charakterisierung der Unschärfe bzw. Unsicherheit des jeweiligen Referenzobjekts.
- Mit diesen Informationen ist für jede Unschärfe/Unsicherheit der Grad der Modellierbarkeit bekannt.

5.3.2 Identifikation von Wirkbeziehungen zwischen unscharfen Parametern

Planungsparameter und deren Unschärfen können, wie in Kap. 5.3.1 beschrieben, durch unterschiedliche Eigenschaften charakterisiert werden. Dies ist auch für die Wirkbeziehungen zwischen den Planungsparametern, die nach dem in Kap. 5.3.2 beschriebenen Vorgehen dokumentiert wurden, der Fall. In Anlehnung an KREBS (2012, S. 81-94) werden in dieser Arbeit drei Arten von Wirkbeziehungen unterschieden (Tabelle 5.2). Während die Berechnungsvorschrift eine mathematische Beziehung z. B. als Formel darstellt (Wirkbeziehung 1. Art), lässt die Korrelation (Wirkbeziehung 2. Art) eine statistische Aussage zur Abhängigkeit von Parametern zu, die mithilfe der Regressionsanalyse[46] in einen formellen Zusammenhang überführt werden kann.

Bei qualitativen Wirkbeziehungen (Wirkbeziehung 3. Art) handelt es sich um nicht-quantifizierbare Abhängigkeiten, bei denen jedoch eine logische Verknüpfung auf Basis von Expertenwissen, z. B. als WENN-DANN-Beziehung, erfolgen kann.

[46] Die Regressionsanalyse stellt eine statistische Methode zur quantitativen Prognose von Werten einer oder mehrerer abhängiger Variablen durch eine Menge unabhängiger Variablen mit bekannten Werten dar (JOHNSON & WICHERN 2007, S. 360).

Die Information, welche Art von Wirkbeziehung zwischen zwei Planungsparametern auftritt, wird für alle Beziehungen zwischen Ein- und Ausgangsparametern innerhalb der Planungsmodule (siehe Abb. 5.3) ermittelt.

Tabelle 5.2: Arten von Wirkbeziehungen zwischen Planungsparametern.

Wirkbeziehungen zwischen Planungsparametern			Beispiel
1	Berechnungs-vorschrift	Ergebnisparameter wird durch eine mathematische Beziehung aus den Einflussparametern berechnet	$A = B + C$
2	Korrelation	Ergebnisparameter kann durch die Bestimmung einer Korrelation mit anderen Einflussparametern prognostiziert werden (Regressionsanalyse)	$A = \beta_1 + \beta_2 B + \varepsilon$
3	Qualitative Wirkbeziehung	Ergebnisparameter ist über eine logische Beziehung mit den Einflussparametern verknüpft	WENN B = x UND C = y, DANN A = z

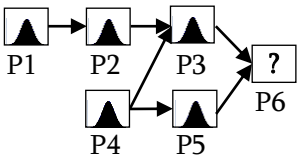
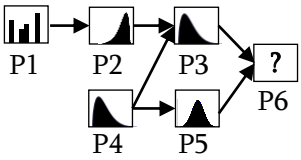
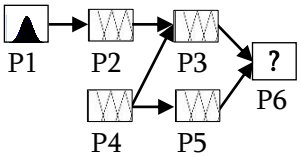
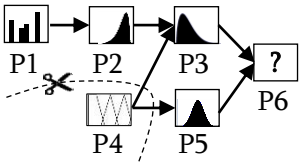
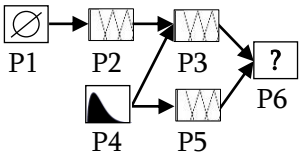
Legende: A: Ergebnisparameter B, C: Einflussparameter β_1, β_2:Regressionskoeffizienten ε: Residualvariable x, y, z: Ausprägungen von A, B, C

Damit sind für das gesamte Wirkungsgefüge der Planungsparameter im Fabrikplanungsprozess die Richtung, die Stärke und die Art der Wirkbeziehungen bekannt. Diese Informationen werden im Folgenden genutzt, um die Unschärfe von abhängigen Planungsparametern unter Verwendung von Unschärfefortpflanzungsmechanismen zu bestimmen. Zur Auswahl eines geeigneten Mechanismus werden zunächst fünf Grundtypen von Wirkungsgefügen aus Einflussparametern und einem abhängigen Parameter (Ergebnisparameter) definiert und diesen wird ein geeigneter Mechanismus zur Analyse der Unschärfefortpflanzung zugeordnet (Abb. 5.6):

Sind alle Unschärfen der Planungsparameter als Normalverteilungen mit jeweils bekannter Varianz modellierbar und liegen gleichzeitig alle Wirkbeziehungen als Berechnungsvorschrift vor (Abb. 5.6, Grundtyp 1), kann der analytische Ansatz der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung als Unschärfefortpflanzungsmechanismus angewendet werden, um die Unschärfe des abhängigen Ergebnisparameters P6 zu berechnen (siehe Kap. 2.3.1, Anwendungsvoraussetzungen der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung).

Sofern alle Unschärfen als kontinuierliche oder diskrete WKV modellierbar sind (Grundtyp 2), kann die Monte-Carlo-Simulation verwendet werden. Dabei sind alle Arten von Wirk-

beziehungen zulässig. Die damit relativ geringen Anforderungen (siehe Kap. 2.3.2, Anwendungsvoraussetzungen der Monte-Carlo-Simulation) sind einer der Gründe, warum die Monte-Carlo-Simulation in der Praxis eine große Verbreitung aufweist.

	Grundtyp des Wirkungsgefüges	Beschreibung/ Randbedingungen	Geeigneter Fortpflanzungs-mechanismus
1		• alle Unschärfen der PP normalverteilt • Varianzen bekannt • nur Wirkbeziehungen 1. Art	Gauß'sche Fehlerfort-pflanzung
2		• alle Unschärfen der PP als diskr. oder kont. WKV modellierbar • Wirkbeziehungen 1., 2. oder 3. Art	Monte-Carlo Simulation
3		• alle Unschärfen der PP als Fuzzy Set oder kont. WKV modellierbar • wenn kont. WKV enthalten, darf diese nicht durch ein Fuzzy Set beeinflusst werden • nur Wirkbeziehungen 3. Art	Fuzzy Inferenz
4		• sowohl diskr. und kont. WKV als auch Fuzzy Sets im Wirkungsgefüge enthalten	Trennung in Subgefüge erforderlich
5		• mindestens eine Unschärfe ist nicht modellierbar	nicht möglich

Legende:
P1 bis P5: Einflussparameter
P6: abhängiger Parameter (Ergebnisparameter)
PP: Planungsparameter
diskr.: diskret
kont.: kontinuierlich
WKV: Wahrscheinlichkeitsverteilung

Wirkbeziehung
Normalverteilung
diskrete Verteilung
kontinuierliche Verteilung
Fuzzy Zugehörigkeitsfunktion
nicht modellierbare Unschärfe

Abb. 5.6: Grundtypen von Wirkungsgefügen unscharfer Planungsdaten.

Sind die Unschärfen der Planungsparameter als Fuzzy Sets modelliert und dementsprechend über qualitative Wirkbeziehungen 3. Art miteinander verknüpft, kann die Fuzzy-Inferenz als Fortpflanzungsmechanismus herangezogen werden. Beim dritten Grundtyp sind außerdem kontinuierliche WKV im Wirkungsgefüge zulässig, sofern diese vor den Parametern auftreten, deren Unschärfe mittels Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion modelliert

wird (siehe Kap. 5.4.1) In diesem Fall können die Standardabweichungen der WKV verwendet werden, um die Grenzen der Fuzzy Sets zu bestimmen, wie in SCHÖNMANN (2018, S. 107) gezeigt. Andersherum ist eine Verrechnung einer Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion in eine WKV nicht direkt möglich.[47]

Dies gilt sowohl für diskrete als auch kontinuierliche WKV. Aus diesem Grund ist der vierte Grundtyp der Wirkungsgefüge gesondert zu behandeln. Die Anwendung der drei vorgestellten Verfahren zur Unschärfefortpflanzung ist nicht möglich, da eine qualitative, als Fuzzy Set modellierte Unschärfe zwei kontinuierliche WKV beeinflusst. Für diesen Fall bestehen zwei Optionen: 1. Die Trennung des Wirkungsgefüges in Subgefüge, sodass einer der Grundtypen 1 bis 3 entsteht. In dem in (Abb. 5.6) dargestellten Wirkungsgefüge des Grundtyps 4 wäre dies durch die Abtrennung des Planungsparameters 4, dessen Unschärfe als einzige als Fuzzy Set modelliert ist, möglich. Dadurch wird jedoch auch der Einfluss des Parameters P4 im Wirkungsgefüge vernachlässigt. Ob dies zulässig ist, muss im Einzelfall durch die Anwender geprüft werden. Die 2. Option stellt die Überführung der qualitativen Unschärfen in eine quantitative dar, also das Ergreifen von Maßnahmen, um die Unschärfe von P4 als subjektive oder objektive WKV darzustellen. Zu diesen Maßnahmen kann beispielsweise die Aufnahme zusätzlicher Daten zählen.

Grundtyp 5 umfasst ein Wirkungsgefüge, in dem mindestens eine der Parameterunschärfen gar nicht modellierbar ist. In diesem Fall ist auch eine Analyse der Unschärfefortpflanzung nicht möglich, der Planungsparameter P1, dessen Unschärfe in Abb. 5.6, Grundtyp 5, nicht modellierbar ist, kann entweder aus dem Wirkungsgefüge eliminiert und damit vernachlässigt werden oder dessen Unschärfe wird, wie auch beim Grundtyp 4, durch geeignete Maßnahmen quantifiziert.

Zusammenfassend führt das in diesem Kapitel beschriebene Vorgehen zur Identifikation relevanter Wirkbeziehungen zwischen unscharfen Parametern zu folgenden Ergebnissen:

- Für jeden abhängigen unscharfen Planungsparameter (Ergebnisparameter) sind dessen Einflussparameter bekannt.

[47] Da bei der Transformation einer Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion in eine WKV ein „etwas willkürlicher Informationszuwachs“ (DUBOIS ET AL. 1993) entstünde, genügt diese Operation nicht dem von KLIR (1990) entwickelten sog. Uncertainty Invariance Principle. Dieses Grundprinzip für die Transformation von Unschärfe- und Unsicherheitsrepräsentationen aus der Möglichkeitstheorie in die Wahrscheinlichkeitstheorie und umgekehrt fordert, dass die Unschärfe/Unsicherheit und die in dieser enthaltenen Information bei einer Transformation grundsätzlich erhalten bleibt.

- Die Art der Wirkbeziehung zwischen jedem Parameterpaar (Berechnungsvorschrift, Korrelation, qualitative Wirkbeziehung) ist identifiziert.
- 5 Grundtypen von Wirkungsgefügen unscharfer Planungsparameter bilden die Basis zur Auswahl geeigneter Mechanismen der Unschärfefortpflanzung unter Berücksichtigung der jeweiligen methodischen Voraussetzungen.
- Mit diesen Informationen ist die Ermittlung der Unschärfe der abhängigen Planungsparameter durch Anwendung der identifizierten Unschärfefortpflanzungsmechanismen möglich (siehe folgendes Kapitel).

5.4 Schritt 3: Unschärfefortpflanzungsanalyse

Auf Basis der in Schritt 2 erlangten Informationen bzgl. der Unschärfen und deren Wirkbeziehungen kann die in diesem Kapitel vorgestellte Unschärfefortpflanzungsanalyse erfolgen. Diese verfolgt das Ziel, die Unschärfe abhängiger Planungsparameter aus den Unschärfen der jeweiligen Einflussparameter und den identifizierten Wirkbeziehungen abzuleiten. In Kap. 5.4.1 wird die Bestimmung der Unschärfe abhängiger Planungsparameter anhand von drei Beispielen zur Anwendung des jeweiligen Unschärfefortpflanzungsmechanismus erläutert. Anschließend wird in Kap. 5.4.2 ein Portfolio zur Ableitung unschärfespezifischer Handlungsempfehlungen vorgestellt, mit dessen Hilfe folgende Fragen beantwortet werden sollen:

1. Welche Unschärfen der Planungsdaten sollten unter Berücksichtigung beschränkter Ressourcen (Zeit und Geld) zuerst verringert werden?
2. Welche Unschärfen sollten (z. B. durch die Erhebung zusätzlicher Daten) besser modelliert werden?

5.4.1 Bestimmung der Unschärfe abhängiger Planungsparameter

Da die Ermittlung der Unschärfe eines abhängigen Parameters je nach Umfang des Wirkungsgefüges und der verfügbaren Daten aufwändig ist, müssen zunächst die für die Strukturplanung und Auslegung der Veränderungsfähigkeit unmittelbar notwendigen Planungsparameter (z. B. Anzahl der Betriebsmittel, Absatzmenge, Produktvarianten) identifiziert werden. Ist deren Unschärfe abhängig von der Unschärfe anderer Einflussparameter im Wirkungsgefüge, wird nur die Unschärfe dieser unmittelbaren Parameter (direkte Parameter) mithilfe der im Folgenden vorgestellten Mechanismen bestimmt.

Beispiel 1: Unschärfefortpflanzung mittels Gauß'schem Fehlerfortpflanzungsgesetz

Im folgenden Beispiel wird die aus einem Wirkungsgefüge des Grundtyps 1 entstehende Unschärfe des Ergebnisparameters Fertigungsfläche bestimmt. In Abb. 5.7 ist das beispielhafte Wirkungsgefüge dargestellt. Jeder Parameterunschärfe liegt eine Normalverteilung mit einem Erwartungswert und einer Standardabweichung zugrunde. Die Parameter sind über Berechnungsvorschriften (Wirkbeziehungen 1. Art) miteinander verknüpft: Die benötigte Anzahl der Betriebsmittel Anz_{BM} errechnet sich aus der Absatzstückzahl s (pro Jahr) und der Kapazität der Betriebsmittel $Kapa_{BM}$ (pro Monat) nach folgender Formel:

$$Anz_{BM} = \frac{s}{Kapa_{BM} \cdot 12} \tag{5.2}$$

Aus Gründen der Einfachheit wird in diesem Beispiel angenommen, dass nur ein Typ Betriebsmittel mit gleicher Grundfläche und Kapazität in dem betrachteten Bereich der Fabrik eingesetzt wird.

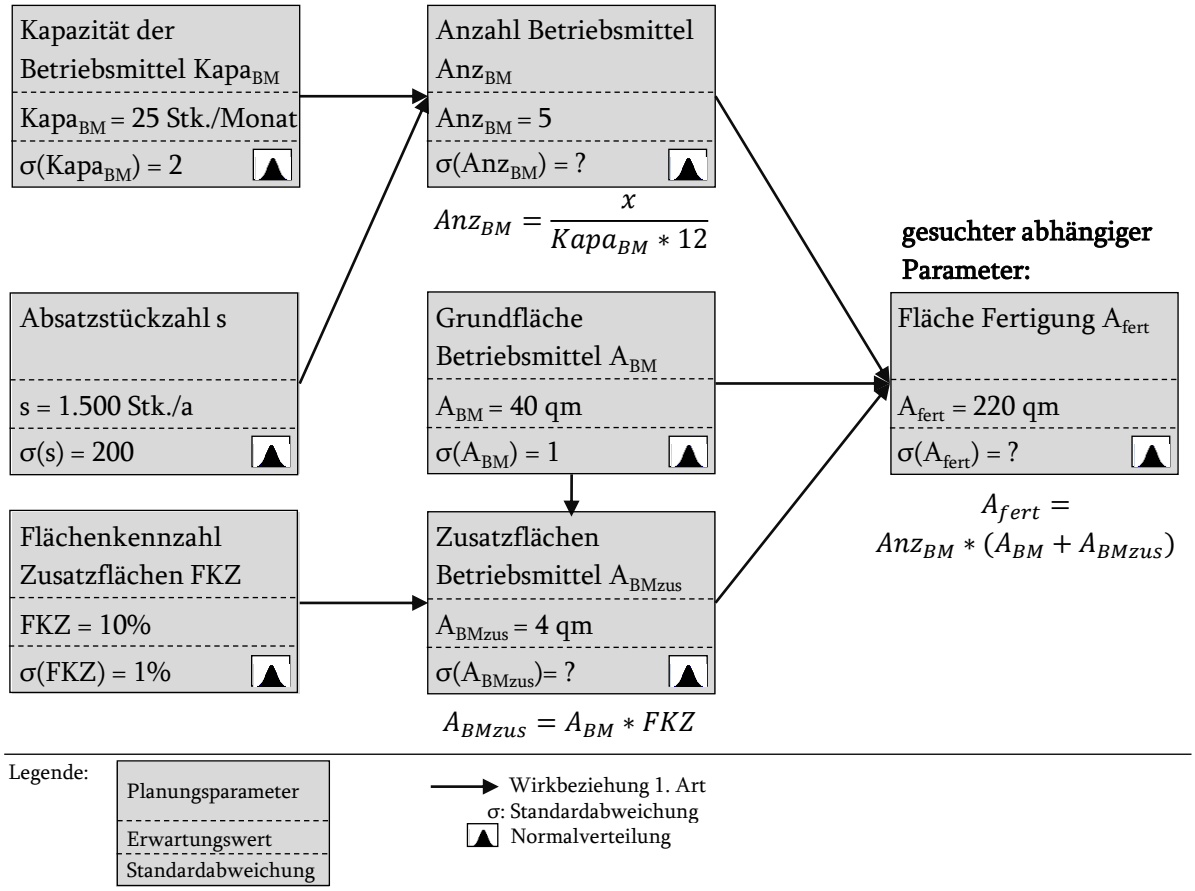


Abb. 5.7: Wirkungsgefüge zur analytischen Ermittlung der Unschärfe des Planungsparameters Fertigungsfläche.

Jedes Betriebsmittel besitzt eine Grundfläche A_{BM} und benötigt eine von dieser abhängige Zusatzfläche A_{BMzus}, die über eine Flächenkennzahl *FKZ* nach folgender Formel kalkuliert wird:

$$A_{BMzus} = A_{BM} \cdot FKZ \tag{5.3}$$

Der gesuchte Ergebnisparameter Fertigungsfläche A_{fert} berechnet sich aus der Anzahl der Betriebsmittel, die mit der Summe aus Grund- und Zusatzfläche pro Betriebsmittel multipliziert wird[48]:

$$A_{fert} = Anz_{BM} \cdot (A_{BM} + A_{BMzus}) \tag{5.4}$$

Anschließend werden die Berechnungsvorschriften für Anz_{BM} (5.2) und A_{BMzus} (5.3) in die Formel für die Berechnung der Fertigungsfläche (5.4) eingesetzt:

$$\Rightarrow A_{fert} = \frac{s}{Kapa_{BM} \cdot 12}\big(A_{BM}(1 + FKZ)\big) \tag{5.5}$$

Die entstehende Berechnungsvorschrift enthält damit nur noch die Eingangsparameter *s*, $Kapa_{BM}$, A_{BM} und *FKZ*, deren Standardabweichungen und Erwartungswerte für die Anwendung des Gauß'schen Unschärfefortpflanzungsgesetzes bekannt sein müssen.

Im nächsten Schritt wird das Gauß'sche Unschärfefortpflanzungsgesetz (siehe Formel (2.7)) auf die Berechnungsvorschrift (5.5) angewandt, um die Unschärfe der Fertigungsfläche auf Basis der Unschärfen (hier: Standardabweichungen) ihrer Einflussgrößen zu bestimmen.

$$\sigma(A_{fert}) \approx \sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial x_i} \cdot \sigma_i\right)^2} \tag{5.6}$$

mit *i:* Nummer der Variablen

n: Anzahl der Variablen

x: Einflussvariable in der Berechnungsvorschrift

[48] Das hier angeführte Beispiel geht auf die Ausführungen von GRUNDIG (2009, S. 103-105) zurück, in denen die Fertigungsfläche aus der Summe der Maschinengrundflächen berechnet und die Zusatzfläche mithilfe eines Zuschlagsfaktors prozentual zur Fertigungsfläche ermittelt wird. Um das angeführte Beispiel übersichtlich zu gestalten, werden Zwischenlager- und Transportflächen nicht betrachtet. Eine Übersicht und Beschreibung der unterschiedlichen Flächen kann NIEHUES (2017, S. 129-132) entnommen werden.

$$\sigma(A_{fert}) \approx \sqrt{\left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial s} \cdot \sigma(s)\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial Kapa_{BM}} \cdot \sigma(Kapa_{BM})\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial A_{BM}} \cdot \sigma(A_{BM})\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial FKZ} \cdot \sigma(FKZ)\right)^2} \tag{5.7}$$

Zur Berechnung der gesuchten Standardabweichung und damit der Unschärfe der Fertigungsfläche müssen die in Formel (5.7) unter der Wurzel aufgeführten partiellen Ableitungen der Funktion A_{fert} nach den Einflussvariablen s, $Kapa_{BM}$, A_{BM} und FKZ gebildet werden. Diese sind im Folgenden aufgeführt und die Variablenwerte aus Abb. 5.7 eingesetzt.

$$\frac{\partial A_{fert}}{\partial s} = \frac{A_{BM}(1 + FKZ)}{Kapa_{BM} \cdot 12} = \frac{40 \cdot (1 + 0{,}1)}{25 \cdot 12} = 0{,}14\overline{6} \tag{5.8}$$

$$\frac{\partial A_{fert}}{\partial Kapa_{BM}} = -\frac{s(A_{BM}(1 + FKZ))}{Kapa_{BM}^2 \cdot 12} = -\frac{1.500 \cdot 5 \cdot (1 + 0{,}1)}{25^2 \cdot 12} = -8{,}8 \tag{5.9}$$

$$\frac{\partial A_{fert}}{\partial FKZ} = \frac{s \cdot A_{BM}}{Kapa_{BM} \cdot 12} = \frac{1.500 \cdot 40}{25 \cdot 12} = 200 \tag{5.10}$$

$$\frac{\partial A_{fert}}{\partial A_{BM}} = \frac{s(1 + FKZ)}{Kapa_{BM} \cdot 12} = \frac{1.500 \cdot (1 + 0{,}1)}{25 \cdot 12} = 5{,}5 \tag{5.11}$$

Werden die Ergebnisse der partiellen Ableitungen in das Gauß'sche Unschärfefortpflanzungsgesetz (5.7) übertragen, lässt sich die Unschärfe des abhängigen Parameters Fertigungsfläche in Form seiner Standardabweichung berechnen:

$$\sigma(A_{fert}) \approx \sqrt{\left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial s} \cdot \sigma(s)\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial Kapa_{BM}} \cdot \sigma(Kapa_{BM})\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial A_{BM}} \cdot \sigma(A_{BM})\right)^2 + \left(\frac{\partial A_{fert}}{\partial FKZ} \cdot \sigma(FKZ)\right)^2} = \sqrt{860{,}0 + 309{,}8 + 30{,}3 + 4{,}0} = 34{,}7\ qm \tag{5.12}$$

Die Werte unter der Formel spiegeln die partiellen Einflüsse der Variablen s, $Kapa_{BM}$, A_{BM} und FKZ auf die Unschärfe des Ergebnisparameters Fertigungsfläche wider. Es ist deutlich erkennbar, dass der größte Anteil von ca. 72 % der Gesamtunschärfe durch die Variable Absatzstückzahl s hervorgerufen wird.

Beispiel 2: Unschärfefortpflanzung mittels Monte-Carlo-Simulation

Zur Erläuterung der Anwendung der Monte-Carlo-Simulation zur Analyse der Unschärfefortpflanzung wird das zuvor angeführte Beispiel 1 adaptiert (Abb. 5.8): Anstelle einer Normalverteilung für die Flächenkennzahl *FKZ* wird eine Gleichverteilung angenommen. Außerdem sei die Absatzstückzahl *s* abhängig von der Einführung einer zusätzlichen Produktvariante B. Für diesen Fall sei in dem Beispiel eine Absatzsteigerung von den bisher angenommenen normalverteilten 1.500 Stück pro Jahr auf 2.000 Stück pro Jahr prognostiziert worden, deren Unschärfe durch eine Extremal-I-Verteilung dargestellt sei. Dieser Sachverhalt ist mithilfe einer diskreten Eintrittswahrscheinlichkeit *P(B)* der Einführung der neuen Produktvariante modellierbar, die im vorliegenden Beispiel 70 % beträgt (Abb. 5.6). Durch das Auftreten einer diskreten Verteilung sowie nicht normalverteilter Unschärfen (Gleichverteilung und Extremal-I-Verteilung) im Wirkungsgefüge (Grundtyp 2, Abb. 5.6) ist die Anwendung des Gauß'schen Unschärfefortpflanzungsgesetzes nicht mehr möglich.

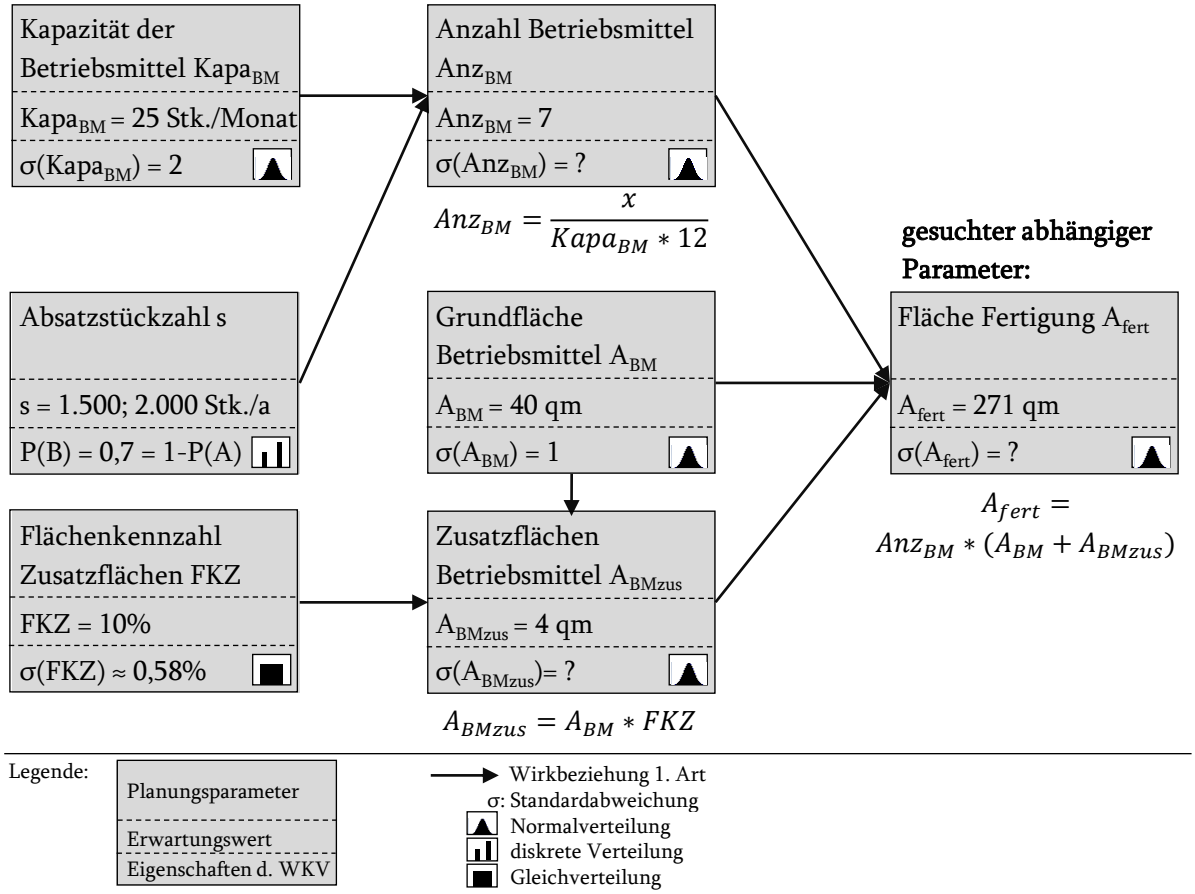


Abb. 5.8: Wirkungsgefüge zur simulativen Ermittlung der Unschärfe des Planungsparameters Fertigungsfläche.

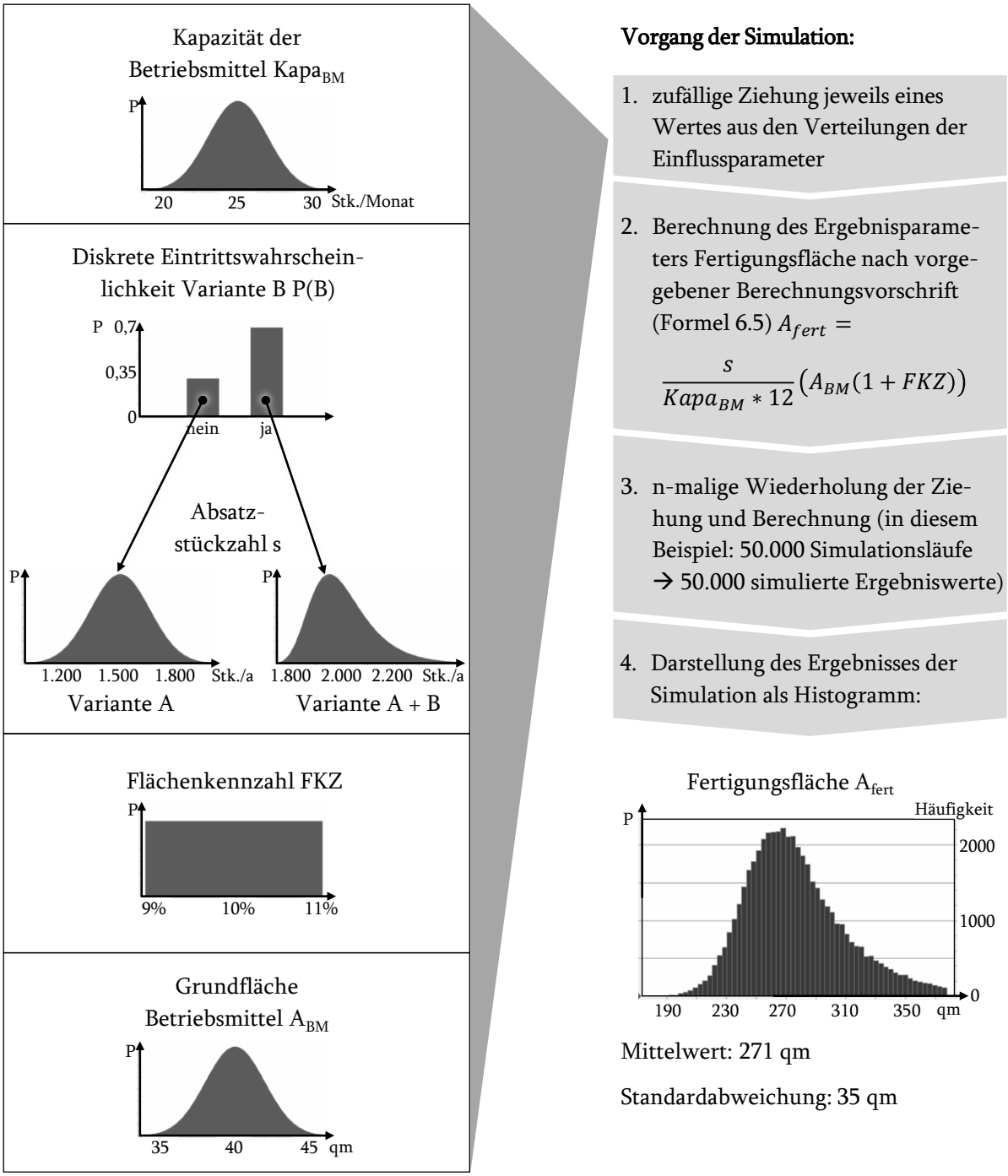


Abb. 5.9: Bestimmung der Unschärfe eines abhängigen Parameters mittels Monte-Carlo-Simulation.

Bei der Anwendung der Monte-Carlo-Simulation werden zunächst die unterschiedlichen Verteilungen der Einflussparameter modelliert (Abb. 5.9). Anschließend werden diese über die identifizierten Berechnungsvorschriften miteinander verknüpft. Mit jedem Simulationslauf werden Ausprägungen der Einflussparameter gemäß deren Verteilung zufällig gezogen und zu Ausprägungen des Ergebnisparameters verrechnet (THOMOPOULOS 2013, S. 1).

Auf diese Weise entsteht eine Häufigkeitsverteilung der simulierten Ausprägungen des Ergebnisparameters (Abb. 5.9), die als Histogramm dargestellt wird (SHONKWILER & MENDIVIL 2009, S. 6).

Der Erwartungswert dieser Verteilung weicht von dem Ergebniswert bei ausschließlicher Berücksichtigung scharfer Werte der Einflussparameter, also bei deterministischer Berechnung, ab (KORVES & KREBS 2008). Die Unschärfe wird, wie in Abb. 5.9 dargestellt, durch die Standardabweichung angegeben. In der Praxis erfolgt dies durch ein Tabellenkalkulationsprogramm wie beispielsweise Microsoft Excel®. Die Simulation der Verteilungen wird durch einschlägige Software, die im Optimalfall eine direkte Einbindung in das Tabellenkalkulationsprogramm ermöglicht, unterstützt (z. B. Oracle Crystal Ball®).

Beispiel 3: Unschärfefortpflanzung mittels Fuzzylogik

Lässt sich das Wirkungsgefüge zur Ermittlung der Unschärfe des abhängigen Planungsparameters dem Grundtyp 3 zuordnen (Abb. 5.6), ist die Fuzzylogik als Unschärfefortpflanzungsmechanismus anzuwenden. Da die zugrunde liegenden Einflussparameter lediglich durch Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen ihrer jeweiligen Ausprägungen (z. B. niedrig, mittel, hoch) quantifiziert werden können, wird in diesem Fall ein anderes Beispiel zur Erläuterung des Vorgehens herangezogen: Es sei der abhängige Parameter Produktionsprinzip mit den möglichen Ausprägungen Baustellen-, Werkstatt-, Gruppen- und Fließfertigung gesucht.[49] Die folgenden drei Einflussparameter werden dabei berücksichtigt: Die Produktionsart stellt lt. KETTNER ET AL. (1984, S. 222) den Haupteinflussfaktor für die Auswahl eines geeigneten Produktionsprinzips dar, wobei ausdrücklich auf die unscharfen Übergänge zwischen Einzel-, Serien- und Massenfertigung hingewiesen wird. Auch die Variantenzahl und damit die Häufigkeit der Änderungen der zu produzierenden Produkte wird als Einflussparameter berücksichtigt, weil damit unterschiedliche Anforderungen an die Flexibilität des Produktionsprinzips einhergehen. Eine Werkstattproduktion ist beispielsweise flexibler und daher für eine hohe Variantenvielfalt besser geeignet als eine Fließproduktion (KETTNER ET AL. 1984, S. 205-208). Des Weiteren wird die vom Kunden geforderte Durchlaufzeit als Einflussparameter in diesem Beispiel berücksichtigt, da die genannten Produktionsprinzipien unterschiedliche Durchlaufzeiten ermöglichen. So ist die bei einer Fließ-

[49] Zur Erläuterung der Produktionsprinzipien sei auf KETTNER ET AL. (1984, S. 205-221) verwiesen. Nach WIENDAHL ET AL. (2009, S. 275-278) wird die Gruppenproduktion auch als Inselproduktion bezeichnet.

oder Gruppenproduktion erreichbare Durchlaufzeit geringer als bei der Werkstatt- oder Baustellenproduktion (WIENDAHL ET AL. 2009, S. 276-277).

Die Variantenzahl sowie die geforderte Durchlaufzeit werden, wie in Abb. 5.10 dargestellt, jeweils durch die Fuzzy Sets *niedrig, mittel* und *hoch* modelliert, die Produktionsart durch die Fuzzy Sets Einzel-, Serien- und Massenproduktion. Für die Anwendung der Fuzzy-Inferenz ist eine Regelbasis, die das Expertenwissen zur Ableitung des Ergebnisparameters aus den möglichen Ausprägungen der Einflussparameter beinhaltet, anzulegen. Die für dieses Beispiel relevanten Regeln sind in Abb. 5.10 unten dargestellt, die vollständige Regelbasis dieses Beispiels kann Anhang J entnommen werden.

Im Rahmen der Aggregation (siehe Kap. 2.3.3 und Abb. 5.10) werden zunächst die Werte der Eingangsparameter (Bedingungen) durch die in der Regelbasis vorgegebenen Operatoren miteinander verknüpft. In der anschließenden Regelauswertung wird der Erfüllungsgrad der Ausgangsparameter (Konklusion) ermittelt. Die einfachste Form der Modellierung von WENN-DANN-Beziehungen, wobei mehrere Bedingungen durch den UND-Operator verbunden sind, stellt, wie in KAHLERT (1995, S. 30) sowie HÖNERLOH (1997, S. 79) ausgeführt, der MIN-Operator[50] dar. Dieser wird aufgrund seiner großen Verbreitung und einfachen Anwendung auch in der vorliegenden Arbeit eingesetzt. Der Zugehörigkeitsgrad $\mu_{Y,r}$ des Ausgangsparameters Y, der durch die Auswertung der Regel r bestimmt wird und von den Werten $x_1,\ldots,x_n$ der n Eingangsparameter $X_1,\ldots,X_n$ abhängt, wird in Anlehnung an KRUSE ET AL. (1994, S. 171) wie folgt berechnet:

$$\mu_{Y,r}(x_1,\ldots,x_n) = MIN\{\mu_{X_1,r}(x_1),\ldots,\mu_{X_n,r}(x_n)\} \tag{5.13}$$

mit Y: Ausgangsparameter

X_n: Eingangsparameter

n: Anzahl der Eingangsparameter

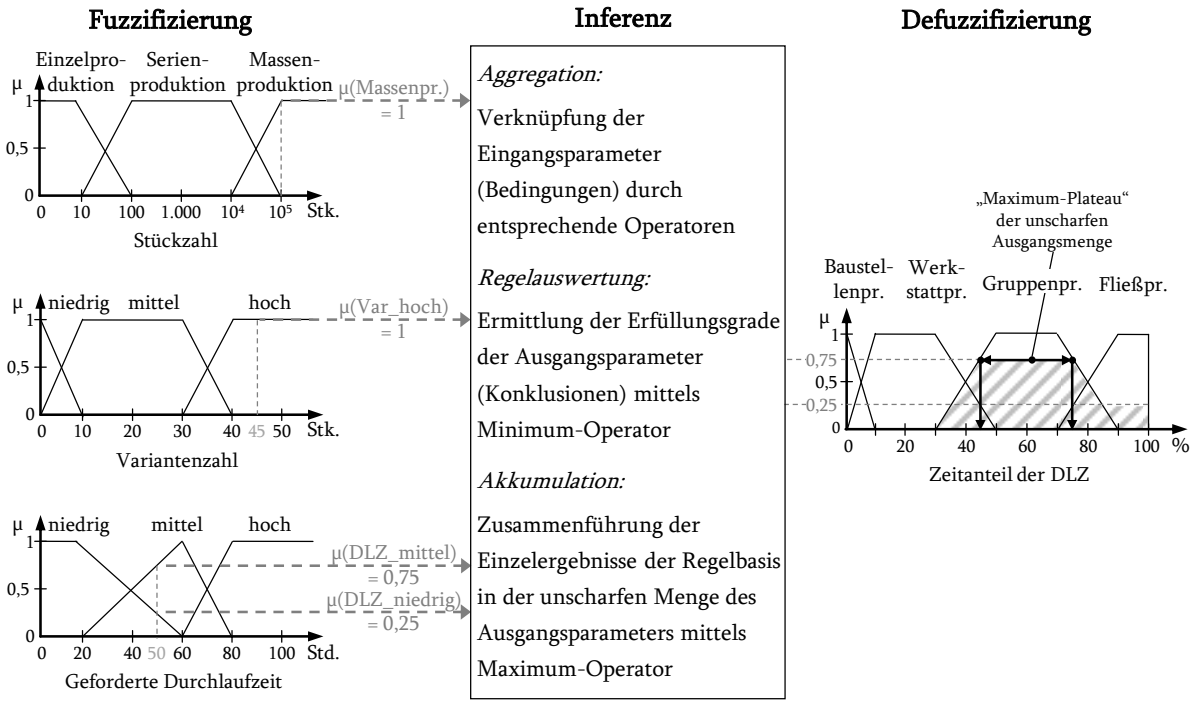
x_n: Wert des Eingangsparameters n

r: Anzahl der Regeln

[50] Die Verwendung des MIN-Operators wird auf die sog. Mamdani-Implikation zurückgeführt, die in der Ausarbeitung von MAMDANI & ASSILIAN (1975) entwickelt wird. Grundlegend ist dabei die Annahme, dass der „Wahrheitsgehalt der Schlussfolgerung nicht größer sein sollte als der der Prämisse“ (KAHLERT 1995, S. 30). Im Gegensatz zu der alternativ anwendbaren sog. Gödel-Transformation stellt die Mamdani-Implikation einen „sehr viel einfacheren näherungsweisen Ansatz“ (BOTHE 1995, S. 148) dar. Aus diesem Grund wird sie in der vorliegenden Arbeit verwendet.

μ: Zugehörigkeitsfunktion

In dem in Abb. 5.10 angeführten Beispiel führt die Verwendung des MIN-Operators dazu, dass der minimale Zugehörigkeitsgrad der UND-verknüpften Prämissen die Zugehörigkeit der Schlussfolgerung (Produktionsprinzip) bestimmt: Bei Regel 25 weist die Prämisse *geforderte Durchlaufzeit = niedrig* mit *μ(DLZ_niedrig) = 0,25* den kleinsten Zugehörigkeitsgrad auf. Dieser beschränkt die Zugehörigkeit des Produktionsprinzips zur Fließproduktion auf *0,25*. Analog wird Regel 26 ausgewertet, in der die *Durchlaufzeit = mittel* mit *μ(DLZ_mittel) = 0,75* die Zugehörigkeit zur Gruppenproduktion vorgibt.



Ausschnitt Regelbasis:

Regel 25: WENN Stückzahl = Massenproduktion UND Variantenzahl = hoch UND Geforderte DLZ = niedrig DANN Fließproduktion

Regel 26: WENN Stückzahl = Massenproduktion UND Variantenzahl = hoch UND Geforderte DLZ = mittel DANN Gruppenproduktion

Abb. 5.10: Bestimmung der Unschärfe eines abhängigen Parameters mittels Fuzzylogik (i. a. A. KAHLERT 1995, S. 67 und KÜMMEKE 2017).

Da bei der Auswertung jeder einzelnen Regel eine Fuzzy-Menge als Ergebnis der Schlussfolgerung entsteht, müssen diese zu einer Ergebnismenge zusammengeführt werden (BOTHE 1995, S. 172). Diese Zusammenführung oder Akkumulation der Schlussfolgerungen der Regelbasis stellt eine Vereinigung in der unscharfen Menge des Ausgangsparameters

dar und erfolgt deshalb unter Anwendung des MAX-Operators[51] (HÖNERLOH 1997, S. 80, KAHLERT 1995, S. 22). Der Inferenzvorgang unter Verwendung des MIN-Operators in der Regelauswertung (Mamdani-Implikation) und des MAX-Operators in der Akkumulation wird *MAX-MIN-Inferenz* genannt (KAHLERT 1995, S. 30, BOTHE 1995, S. 148).

In Abb. 5.10 ist das Ergebnis der Akkumulation mit der schraffierten Fläche des Ausgangsparameters Produktionsprinzip dargestellt.

Die Auswertung von Regel 25 führt zu dem Ergebnis Fließproduktion mit einem Zugehörigkeitsgrad von 0,25 und die Regel 26 hat die Zugehörigkeit zum Ergebnis Gruppenproduktion mit 0,75 zufolge. Die schraffierte Fläche bildet unter Verwendung des MAX-Operators die Vereinigung beider Mengen und stellt damit die unscharfe Ergebnismenge dar.

Den letzten Schritt der Analyse eines Wirkungsgefüges vom Grundtyp 3 stellt die Defuzzifizierung (siehe Kap. 2.3.3) dar, um eine Handlungsempfehlung aus der unscharfen Ergebnismenge des Ausgangsparameters abzuleiten. Zu diesem Zweck kommt die sog. *Maximum-Methode* aufgrund ihrer geringen Komplexität und einfachen Anwendbarkeit zum Einsatz. Ein weiterer Vorteil der Maximum-Methode ist lt. KRUSE (1986, S. 174), dass diese auch dann anwendbar ist, wenn der Wertebereich des Ausgangsparameters Y nicht als Teilmenge der reellen Zahlen quantifiziert werden kann. Bei der Maximum-Methode kann in dem Intervall, in dem der Zugehörigkeitsgrad der unscharfen Ergebnismenge ein Maximum annimmt, ein beliebiger Wert durch den Anwender ausgewählt werden (KRUSE 1986, S. 174, KAHLERT 1995, S. 54-56, ZIMMERMANN 2001, S. 233-234). In dem in Abb. 5.10 aufgeführten Beispiel ist dieser durch das *Maximum-Plateau* der Zugehörigkeit zur Gruppenfertigung mit 0,75 im Intervall [45 %; 75 %] gegeben. Die gewählte Einheit für die Ausprägung des Produktionsprinzips ist in diesem Beispiel der Zeitanteil der Durchlaufzeit, in dem sich das Produkt „im Fluss“ befindet und aktiv bewegt wird. Dieser liegt bei der Baustellenproduktion typischerweise bei 0 %, bei der Fließproduktion bei nahezu 100 %, mit unscharfen Übergängen zwischen den Produktionsprinzipien.

Da für die Anwendung dieser Arbeit jedoch nicht, wie bei der Fuzzy-Regelung ein scharfer Stellwert benötigt wird, sondern vielmehr eine Aussage, welche der durch linguistische

[51] Während die Vereinigung mehrerer unscharfer Mengen der logischen ODER-Verknüpfung entspricht und mithilfe des MAX-Operators modelliert wird, entspricht die Schnittmengenbildung der logischen UND-Verknüpfung, die mithilfe des MIN-Operators zu modellieren ist (KAHLERT 1995, S. 22). Eine Übersicht relevanter Operationen auf unscharfen Mengen kann KAHLERT (1995, S. 24) entnommen werden.

Variablen repräsentierten Ausprägungen des Ausgansparameters Y in Abhängigkeit der Eingangsparameter gewählt werden sollte, sind komplexere Methoden der Defuzzifizierung (wie beispielsweise die Flächenschwerpunktmethode, bei welcher der mithilfe eines Integrals berechnete Flächenschwerpunkt der unscharfen Ausgangsmenge als scharfer Stellwert herangezogen wird (KRUSE 1986, S. 175)) weder erforderlich noch zielführend.[52]

Zusammenfassend führen die in diesem Kapitel beschriebenen Mechanismen zur Bestimmung der Unschärfe abhängiger Planungsparameter zu folgenden Ergebnissen:

- Für jeden der in Kap. 5.3.2 definierten Grundtypen der Wirkungsgefüge unscharfer Planungsparameter ist ein geeigneter Mechanismus der Unschärfefortpflanzung anwendbar. Die relevanten Mechanismen wurden jeweils anhand eines Beispiels erläutert.
- Die Unschärfen der abhängigen Planungsparameter können damit bestimmt werden.

5.4.2 Ableitung unschärfebezogener Handlungsempfehlungen

In den vorangegangenen Kapiteln 5.2 bis 5.4.1 wurden die Aktiv- und Passivsummen der im Fabrikplanungsprozess vorhandenen Planungsparameter identifiziert, deren Unschärfe modelliert und die jeweilige Modellierbarkeit ermittelt sowie die Unschärfefortpflanzung im Wirkungsnetz der Parameter und die Auswirkung auf abhängige Ergebnisparameter untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in dem vorliegenden Kapitel in die Ableitung einer unschärfebezogenen Handlungsempfehlung ein. Diese verfolgt das Ziel, eine Entscheidungsunterstützung für die Reduktion bestimmter Unschärfen bzw. die Verbesserung der Modellierbarkeit bereitzustellen. Die Handlungsempfehlung ist von Bedeutung, da im folgenden Kap. 5.5 die für die Kompensation der vorliegenden Unschärfen notwendige Veränderungsfähigkeit der Fabrik gestaltet wird. Je stärker die Unschärfen der Planungsparameter im Vorfeld reduziert werden können, desto weniger ausgeprägt muss die Veränderungsfähigkeit der Fabrikstrukturen, die mit entsprechenden Kosten einhergeht,

[52] Sollte der Anwender einen scharfen Wert als Ausgangsgröße der Defuzzifizierung benötigen, können nach ZIMMERMANN (2001, S. 233-234) und KAHLERT (1995, S. 54-56) bei der Maximum-Methode der Mittelwert (Center Of Maximum, COM) sowie der linke (Left Of Maximum, LOM) oder rechte Randpunkt (Right Of Maximum, ROM) des Intervalls maximaler Zugehörigkeit herangezogen werden. Zur Erläuterung der drei genannten Defuzzifizierungsstrategien sei auf KAHLERT (1995, S. 54-56) verwiesen.

sein. In Analogie zur Produktentwicklung gilt auch für die Fabrikplanung, dass Anpassungen in frühen Phasen nur einen Bruchteil der Kosten von Anpassungen in der Serie bzw. im laufenden Fabrikbetrieb verursachen, diese aber maßgeblich beeinflussen (EHRLENSPIEL ET AL. 2005, CONSTANTINESCU & WESTKÄMPER 2010, EIGNER ET AL. 2014, S. 17-19). Da die Unschärfe die Basis für die Gestaltung der Veränderungsbefähiger der Fabrik darstellt, ist eine exakte Analyse derselben in der Phase der Planung unumgänglich zur Reduktion späterer ungeplanter und damit kostspieliger Anpassungen.[53]

Zur Ableitung einer Handlungsempfehlung auf Basis der nunmehr vorliegenden Informationen wird ein sog. **Unschärfeportfolio** entwickelt, auf dessen Ordinate die Modellierbarkeit *M* der Unschärfe eines Planungsparameters (siehe Kap. 5.3.1) und auf dessen Abszisse die Aktivsumme *AS* der Planungsparameter (siehe Kap. 5.2) abgetragen ist (Abb. 5.11). Die Unschärfen der Planungsparameter werden mithilfe von Kreisen dargestellt. Das Unschärfeportfolio kann genutzt werden, um für einen abhängigen Planungsparameter die unscharfen Einflussfaktoren sowie die Wirkbeziehungen darzustellen. In Abb. 5.11 sind für das in Kap. 5.4.1 angeführte Beispiel des abhängigen Parameters Fertigungsfläche die Unschärfen der Einflussparameter sowie die Wirkbeziehungen visualisiert. Dabei stellen die Größe der Kreise und die jeweils angegebenen Prozentwerte die relative Unschärfe, also den jeweiligen Einfluss eines unscharfen Parameters auf die Unschärfe der Ergebnisgröße Fertigungsfläche *U(A_fert)* dar. Die relativen Unschärfen liegen als Ergebnisse der Unschärfefortpflanzungsanalyse bereits vor. Aus dem in Abb. 5.11 dargestellten Beispiel wird ersichtlich, dass in diesem Fall die Unschärfe der Absatzmenge mit 72 % den größten Anteil zur Gesamtunschärfe der Fertigungsfläche beiträgt. Die Unschärfe des Planungsparameters Anzahl Betriebsmittel *U(Anzahl_BM)* addiert sich aus der Unschärfe der Absatzmenge *U(Absatzmenge)* und der Unschärfe der Betriebsmittelkapazität *U(Kapa_BM)*, da diese, wie in Kap. 5.4.1 beschrieben, nach Formel (5.2) miteinander verrechnet werden.

Das Portfolio ist in drei Bereiche unterteilt: In Bereich I sind Unschärfen mit einer hohen Aktivsumme und einer guten Modellierbarkeit aufgeführt. Sofern in diesem Bereich Parameter mit einer gleichzeitig hohen relativen Unschärfe liegen, sollten diese Unschärfen, sofern möglich, reduziert werden. In Bereich II sind Unschärfen von Planungsparametern

[53] In der Produktentwicklung wird der Ansatz, Methoden des Anforderungs-, Kosten- und Risikomanagements bereits in der frühen Konzeptphase einzusetzen, um eine optimale und systematische Beeinflussung der Produktkosten zu bewirken, als *Frontloading* bezeichnet (SZEGHŐ & BERCSEY 2007, EIGNER 2010).

aufgeführt, die zwar eine hohe Aktivsumme im Planungsprozess aufweisen, allerdings schwieriger modellierbar bzw. nicht quantifizierbar sind. Da bei geringer Modellierbarkeit weniger Informationen bezüglich der Ausprägung der Unschärfe vorliegen (siehe Kap. 5.3.1), wird als Handlungsempfehlung für Unschärfen im Bereich II die Verbesserung der Modellierbarkeit bzw. Quantifizierung der Unschärfe gegeben. Damit wird eine Überführung der Unschärfe aus dem Bereich II in den Bereich I angestrebt.

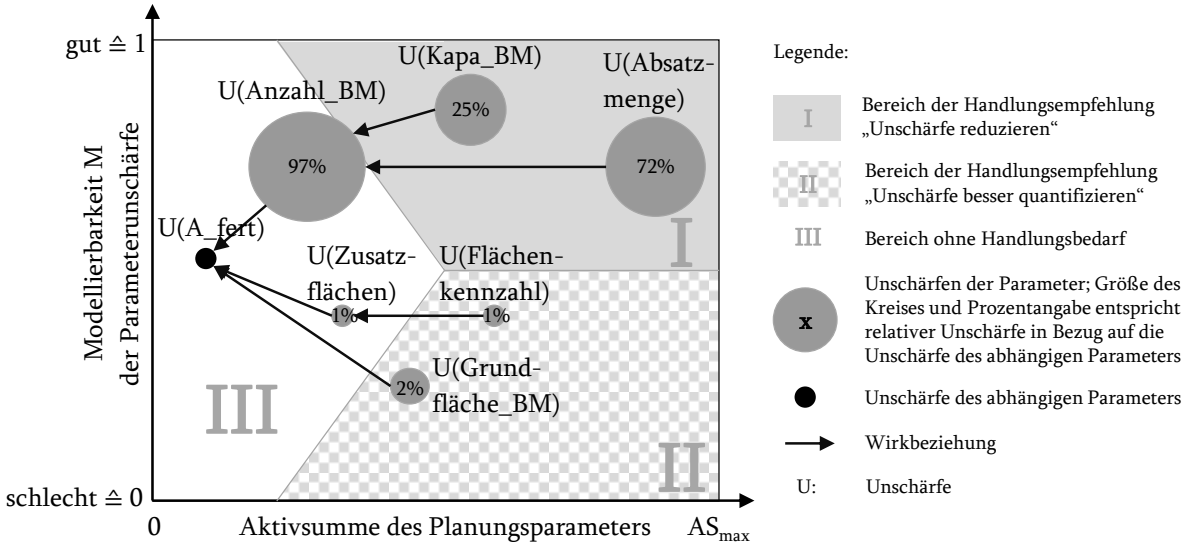


Abb. 5.11: Unschärfeportfolio mit Wirkbeziehungen zwischen unscharfen Einflussparametern.

Im Bereich III des Unschärfeportfolios befinden sich Unschärfen, die eine geringe Aktivsumme aufweisen. Da diese im Planungsprozess nur wenige andere Parameter beeinflussen und damit keine starke Fortpflanzung der Unschärfe stattfindet, werden diese zunächst nicht weiter betrachtet. Ist jedoch die relative Unschärfe (also der angegebene Prozentwert) eines Parameters im Bereich III sehr hoch, sollte untersucht werden, welche weiteren Parameter einen Einfluss auf diese Unschärfe haben und diese ggf. reduziert werden.

Zusammenfassend führt das in diesem Kapitel erläuterte Vorgehen zu folgenden Ergebnissen:

- Mithilfe des Unschärfeportfolios werden zum einen Unschärfen identifiziert, die reduziert werden sollten, zum anderen Unschärfen benannt, für die eine bessere Modellierbarkeit angestrebt werden sollte.
- Eine Darstellung der unscharfen Einflussfaktoren eines abhängigen Planungsparameters lässt Rückschlüsse zur Verringerung der Gesamtunschärfe desselben durch die Reduzierung der größten relativen Unschärfe der Einflussfaktoren zu.

- Insgesamt wird mit diesem Vorgehen sichergestellt, dass alle relevanten Unschärfen vor der Planung der Veränderungsfähigkeit (Kap. 5.5 bis 5.7) so weit wie möglich reduziert bzw. quantifiziert werden.

5.5 Schritt 4: Auswahl und Dimensionierung relevanter Veränderungsbefähiger

Während im Fokus des vorangegangenen Kapitels die Analyse des Planungsprozesses, die Identifikation relevanter Planungsparameter sowie die Klassifizierung und Modellierung von Unschärfen derselben stehen, wird in diesem Kapitel eine Methode zur Ermittlung und Planung der benötigten Veränderungsfähigkeit einer Fabrik auf Basis der Unschärfen präsentiert. Für die Auswahl geeigneter Veränderungsbefähiger müssen zunächst folgende Fragen beantwortet werden:

1. Welche Veränderungsbefähiger existieren und kommen allgemein für die Gestaltung von Fabrikstrukturen infrage?
2. Welche Veränderungsbefähiger bieten Potenzial zur Kompensation bestimmter Parameterunschärfen?

In Kap. 5.5.1 wird durch den Aufbau eines sog. VBF-Referenzkatalogs eine Antwort auf Frage 1 gegeben. Frage 2 wird mithilfe einer Onlineumfrage zur Ermittlung von Unschärfe-Kompensationspotenzialen der VBF und einer darauf basierenden Methode zur Dimensionierung der VBF beantwortet (Kap. 5.5.2).

5.5.1 Vorauswahl realisierbarer Veränderungsbefähiger

<u>Empirisch-induktiver Teil:</u>

Welche VBF im Allgemeinen existieren und für die Gestaltung von Fabrikstrukturen infrage kommen, wurde im Rahmen der ersten Experteninterviewreihe (siehe Anhang B und C) sowie einer Literaturanalyse beantwortet.

Zunächst wurde basierend auf den Arbeiten von HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 54-56), FINK (2003), HEGER (2007, S. 67-101), JANORSCHKE & PRITZEL (2009), WIENDAHL ET AL. (2009, S. 128-134), NYHUIS (2010, S. 26-28) sowie SCHENK ET AL. (2014A, S. 40-43) ein Katalog von Veränderungsbefähigern zusammengestellt, der die wichtigsten in der Literatur

aufgeführten VBF umfasst. Des Weiteren wurden Experten aus dem Bereich der Fabrikplanung befragt, welche Veränderungsbefähiger aus ihrer Sicht relevant sind (siehe Referenzkatalog der Veränderungsbefähiger in Anhang K) und der Katalog um zusätzliche Nennungen ergänzt.

Redundante VBF wurden zusammengefasst und der Katalog in drei Ebenen strukturiert (Abb. 5.12): Primärbefähiger sind allgemeingültig und weisen einen hohen Abstraktionsgrad auf. Zu diesen zählen die in Kap. 3.4.3 erläuterten Veränderungsbefähiger *Universalität, Skalierbarkeit* etc. Da die Primärbefähiger aufgrund des hohen Abstraktionsgrades nur bedingt geeignet für die Ableitung einer Handlungsempfehlung zur Gestaltung von Fabrikstrukturen sind, werden diese von unterschiedlichen Autoren wie beispielsweise HEGER (2007, S. 67-101) oder MÖLLER (2008, S. 104-105) durch den Bezug auf ein sog. *Fabrikgestaltungsfeld* konkretisiert. Wird z. B. der Primärbefähiger *Universalität* auf das Gestaltungsfeld *Fläche* bezogen, ergibt sich der Sekundärbefähiger *Universell nutzbare Flächen*. Dabei sind nicht alle Kombinationen aus Primärbefähiger und Gestaltungsfeld zulässig (NYHUIS 2010, S. 29). Beispielsweise sind Flächen generell ortsfix und können daher nicht mit dem Veränderungsbefähiger *Mobilität* kombiniert werden.

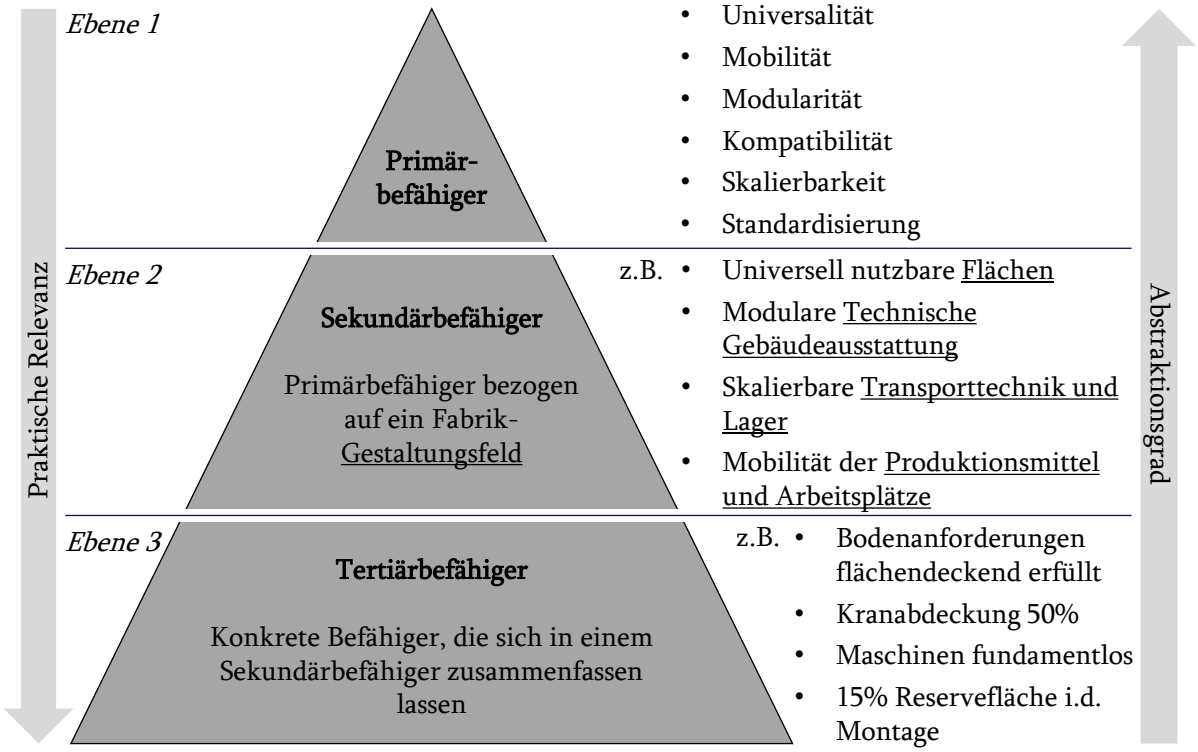


Abb. 5.12: Schema zur Strukturierung der Veränderungsbefähiger nach Abstraktionsgrad.

Als Gestaltungsfelder der Fabrik werden in dieser Arbeit i. A. a. MÖLLER (2008, S. 104) *Fläche, Gebäude und TGA (Technische Gebäudeausstattung), Transporttechnik und Lager, Produktionsmittel und Arbeitsplätze* sowie *Organisation und Mitarbeiter* unterschieden. Als separat zu betrachtendes Gestaltungsfeld wurde der *Planungsprozess* zur Bündelung von Befähigern mit Bezug zum Fabrikplanungsprozess hinzugefügt.

Jeder im Katalog aufgeführte Sekundärbefähiger umfasst mehrere Tertiärbefähiger (Abb. 5.12). Diese sind von hoher praktischer Relevanz und sehr konkret, wie beispielsweise *Bodenanforderungen flächendeckend erfüllt, 50 % Kranabdeckung innerhalb der Fabrikhalle* oder *15 % Reservefläche in der Montage*. Diese Strukturierung der Veränderungsbefähiger bildet das Grundgerüst des Katalogs, der alle im Rahmen der Literaturanalyse und den anschließenden Experteninterviews identifizierten Sekundär- und Tertiärbefähiger umfasst und damit eine Referenz für beliebige Fabrikplanungsvorhaben darstellt. Daher wird diese Zusammenstellung von Veränderungsbefähigern im Folgenden als **VBF-Referenzkatalog** bezeichnet. Der vollständige Katalog mit 122 Tertiärbefähigern ist in Anhang K aufgeführt.

5.5.2 Unschärfebasierte Dimensionierung relevanter Veränderungsbefähiger

Um die zweite der o. g. Fragen (Welche Veränderungsbefähiger bieten Potenzial zur Kompensation bestimmter Parameterunschärfen?) zu beantworten, wurden Sekundärbefähiger den in den Experteninterviews meistgenannten unscharfen Planungsparametern in einer Matrixdarstellung gegenübergestellt. In Abb. 5.13 ist ein Auszug dieser unscharfen Parameter (z. B. Absatzmenge) mit beispielhaften, durch den in Kap. 5.3.1 beschriebenen Leitfaden ermittelten Unschärfen aufgeführt.

<u>Empirisch-induktiver Teil:</u>

Zunächst wurden die Informationen, welcher VBF zur Kompensation bestimmter Unschärfen geeignet ist, literaturbasiert ermittelt. Ist eine Kompensation möglich, wird dies in Abb. 5.13 mit einem „x“ in der entsprechenden Zelle der Matrix dargestellt.[54] Zur Validierung

[54] Die Matrix ist wie folgt zu lesen: Ist ein x in einer Zelle vorhanden, ist der Sekundärbefähiger in der Zeile (links) geeignet, um die Parameterunschärfe in der Spalte (oben) zu kompensieren.

dieser Kompensationspozentiale wurde eine Onlineumfrage[55] mit folgenden Teilnehmergruppen durchgeführt:

Experten, die auch an den Interviews teilgenommen haben, Kompetenzträger im Bereich Fabrik- (Struktur- und Layout-), Produktions-, Prozess- und Logistikplanung, wobei sowohl Teilnehmer aus der Beratungsbranche als auch aus produzierenden Unternehmen befragt wurden. Die Rückläuferquote der Umfrage liegt bei 61 %[56], die Gesamtzahl der Antworten beträgt n = 28. Die vollständigen Ergebnisse der Befragung sind in Anhang E aufgeführt. Ein Kompensationspotential wurde als validiert angesehen, sofern ein signifikanter Anteil von über 50 % der Befragten die Kompensation einer Unschärfe durch einen VBF mit *gut* oder *sehr gut* bewertet hat.

Die in den Zeilen angeführten Sekundärbefähiger umfassen jeweils mehrere Tertiärbefähiger, wie für *universell nutzbare Flächen* visualisiert. Die Aufgabe der Planenden ist in diesem Schritt, mithilfe der in der Matrix (Abb. 5.13) angegebenen Kompensationspotenziale im Rahmen eines Workshops zunächst die Sekundärbefähiger und anschließend deren Tertiärbefähiger zu identifizieren, die im spezifischen Planungsfall relevant sind und diese zu dimensionieren. Es ist sinnvoll, dass dieser Schritt durch die Planenden vollzogen wird, da lt. ENGHARDT (1987, S. 6-7) „die umfassende Würdigung und die richtige Gewichtung aller einzukalkulierenden Unsicherheiten […] nur der erfahrene Planer in das Projekt einbringen“ kann. Das in Abb. 5.13 dargestellte Vorgehen kann am Beispiel des unscharfen Parameters *Produktionstechnologie* und des diesen kompensierenden VBF *universell nutzbare Flächen* in vier Schritten detailliert beschrieben werden:

1. Die Unschärfe der Produktionstechnologie ist bekannt (in diesem Beispiel wird die Einführung der unterschiedlichen Produktionstechnologien zu einem bestimmten Zeitpunkt mit jeweils diskreten Eintrittswahrscheinlichkeiten modelliert) und liegt den Planenden explizit vor. Zunächst wird für den Eintrag „x“ in der Spalte *Produktionstechnologie* der Matrix die Zeile des Sekundärbefähigers *universell nutzbare Flächen* betrachtet.

[55] Ein Auszug der Umfrage ist in Anhang D dargestellt.
[56] Die hohe Rückläuferquote lässt sich mit der vorherigen telefonischen Ankündigung der Umfrage erklären.

Auszug der in Kap. 5.3.1 ermittelten Unschärfen der Planungsparameter →

Sekundärbefähiger (VBF_2) ↓

		Markt und Kunde		Produktbezogene Daten		Prozessbezogene Daten		
		Absatzmenge	Produktvarianten	Teileform und -geometrie	Werkstoff	Produktionstechnologie	Betriebsmittelanzahl	Losgröße
Fläche	Skalierbare Flächen	x					x	x
	Standardisierte und modulare Flächen		x	x		x		
	Universell nutzbare Flächen	x	x	x	x	x		
Gebäude	Kompatibilität der TGA und Vernetzungsfähigkeit durch TGA					x		
	Mobilität durch TGA-Gestaltung						x	
	Modulare und standardisierte TGA und Gebäude		x	x	x	x		
	Skalierbarkeit der Gebäude und TGA	x					x	x
	Universalität der Gebäude und TGA	x	x	x	x	x		
Produktionsmittel und Arbeitsplätze	Mobilität der Produktionsmittel und Arbeitsplätze					x	x	
	Standardisierte, modulare Produktionsmittel und Arbeitsplätze		x	x	x	x		
	Skalierbare Gestaltung der Produktionsmittel und Arbeitsplätze	x					x	x
	Universelle Produktionsmittel und	x						

Tertiärbefähiger (VBF_3)

	beispielhafte Idealwerte
• Bodenanforderungen flächendeckend erfüllen (z.B. einheitliche Bodenplatte)	2.000 kg/m²
• breite, für zukünftige Anforderungen geeignete, ggf. überdimensionierte Wege	4 m
• gesamte Fläche kann von allen Transportmitteln befahren werden	ja
• Logistikfläche kann in Montagefläche umgewandelt werden und umgekehrt	100%
• großes Stützenrastermaß (Säulenabstand)	25 m
• keine Spezialflächen nur für bestimmte Funktionen, Anteil Flächenneutralität	90 %
• …	

Auszug VBF-Referenzkatalog

Legende: TGA: Technische Gebäudeausstattung

Abb. 5.13: Auswahl und Dimensionierung geeigneter VBF zur Kompensation vorhandener Unschärfen.

2. Die im VBF-Referenzkatalog hinterlegten Tertiärbefähiger des Sekundärbefähigers *universell nutzbare Flächen* werden anschließend einzeln auf Kompensationspotenziale bzgl. der Unschärfe der Produktionstechnologie überprüft. Ist eine Kompensation möglich, wird die dafür ideale Ausprägung des Tertiärbefähigers durch die Planenden im Workshop definiert. Dabei werden zunächst weder Wechselwirkungen zwischen den VBF noch monetäre Restriktionen berücksichtigt. Ist beispielsweise für eine mögliche in Zukunft einzusetzende Produktionstechnologie aufgrund schwererer Betriebsmittel eine Bodenbelastbarkeit von 2000 kg/m² erforderlich, so wird diese als Idealwert für den Tertiärbefähiger *Bodenanforderungen flächendeckend erfüllen* herangezogen.
3. Tertiärbefähiger, die bereits im Voraus für den spezifischen Planungsfall ausgeschlossen werden können, werden aus der Liste eliminiert. Beispielsweise ist das *Stützenrastermaß* (in Abb. 5.13 grau dargestellt) bei der Umplanung einer Brownfield[57]-Fabrik nur in seltenen Fällen veränderbar, sodass dieses als Tertiärbefähiger nicht infrage kommt.
4. Anschließend wird die nächste Unschärfe mit Bezug zu demselben Sekundärbefähiger betrachtet (nächstes „x“ in derselben Zeile), in diesem Beispiel die Unschärfe der Betriebsmittelanzahl. Die Idealwerte werden mit Bezug auf diese Unschärfe durch die Planenden korrigiert, sofern ein höherer Wert zur Kompensation der Unschärfe nötig ist. Ist das letzte „x“ der Zeile erreicht, wird mit dem nächsten Sekundärbefähiger in der darauffolgenden Zeile fortgefahren, bis die Idealwerte aller relevanten Tertiärbefähiger bestimmt wurden.

Da bei dem entwickelten Vorgehen keine feste, algorithmisierte Kopplung von Unschärfe und VBF besteht und die Auslegung der Tertiärbefähiger mit der Definition von Idealwerten durch die Planungsexperten erfolgt, kann branchen- und projektspezifisches Expertenwissen in die Dimensionierung der VBF einfließen. Der kreative Charakter eines Workshops bleibt erhalten, die Planungstätigkeit wird durch die Methode zwar systematisch unterstützt, jedoch nicht automatisiert. Das beschriebene Vorgehen lässt die Planenden damit aktiv an der Methode partizipieren, die vorhandenen Informationen bzgl. der Unschärfen

[57] Nach CLAUSSEN (2012, S. 384) ist ein Brownfield eine Fabrik, bei der bereits existierende Strukturen umgestaltet werden, im Gegensatz zu einem Greenfield, das eine vollständig neu zu planende Fabrik darstellt.

im Rahmen des Workshops kognitiv verarbeiten und interaktiv die Auswahl und Dimensionierung der VBF durchführen.[58]

Zusammenfassend führt das in diesem Kapitel erläuterte Vorgehen zu folgenden Ergebnissen:

- Die für das spezifische Fabrikplanungsprojekt relevanten Veränderungsbefähiger zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen sind identifiziert.
- Die für die Kompensation der Unschärfen idealen Ausprägungen aller relevanten Tertiärbefähiger sind definiert.

5.6 Schritt 5: Veränderungsbefähiger-Kombination

Die nächsten Schritte in der Methode zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen sind die Einflussanalyse (Kap. 5.6.1) sowie die Kombination der VBF. (Kap. 5.6.2). Ziel der Einflussanalyse ist die Erhebung und Modellierung von Wirkbeziehungen und die Ableitung einer Kennzahl, die für jeden VBF ein Gütemaß für das Zusammenwirken mit anderen VBF im Wirkungsgefüge darstellt. Mithilfe dieser Kennzahl werden die VBF anschließend so kombiniert, dass eine optimale Kompensation der vorhandenen Unschärfen erfolgt. Zu diesem Zweck wird in Kap. 5.6.2 ein Modell entwickelt, welches das Vorgehen der Experten zur Kombination der VBF im Rahmen eines Workshops strukturiert vorgibt.

5.6.1 Einflussanalyse der Veränderungsbefähiger

Nachdem die Idealwerte der VBF im vorherigen Kapitel bestimmt wurden, werden im nächsten Schritt die aktuellen Ist-Ausprägungen der VBF in der vorhandenen Fabrikstruktur erhoben (Abb. 5.14). Da Ist-Werte ausschließlich bei einer Brownfield-Umplanung vorliegen, werden im Falle einer Greenfield-Planung entweder bereits vorhandene Planstände verwendet oder auf Referenz- bzw. Minimalwerte aus anderen Werken des Unternehmens zurückgegriffen. Ziel ist es, mithilfe eines sog. Erfüllungsgrades zu untersuchen, ob ein VBF in seiner Ausprägung eher erhöht oder verringert werden sollte, um eine optimale Kompensation der vorhandenen Unschärfen zu gewährleisten.

[58] ENGHARDT (1987, S. 6) hebt in seinen Ausführungen die Bedeutung von wissensbasiert-manuellen Aktivitäten durch den Menschen in der Planung hervor, BRINKMANN (1989, S. 24) sowie WEIDIG & AURICH (2014) weisen auf die Verwendung von numerisch-logischen Verfahren wie Algorithmen und Rechenprogrammen ausschließlich als Hilfsmittel für die Planenden hin, um eine maximale Ergebnisqualität zu gewährleisten.

Tertiärbefähiger ($VBF_{3,i}$)	Idealwert	Istwert	Erfüllungsgrad $EG_{VBF3,i}$ (= Ist-/Idealwert)
• Bodenanforderungen flächendeckend erfüllen (z.B. einheitliche Bodenplatte)	2.000 kg/m²	1.000 kg/m²	50%
• breite, für zukünftige Anforderungen geeignete, ggf. überdimensionierte Wege	4 m	3 m	75%
• gesamte Fläche kann von allen Transportmitteln befahren werden	ja	nein	0%
• Logistikfläche kann in Montagefläche umgewandelt werden und umgekehrt	100%	60%	60%
• großes Stützenrastermaß (Säulenabstand)	25 m	25 m	100%
• keine Spezialflächen nur für bestimmte Funktionen, Anteil Flächenneutralität	90 %	80 %	89 %
• …			

mehrere Sekundärbefähiger

Abb. 5.14: Ermittlung des Erfüllungsgrades von Tertiärbefähigern.

Der Quotient aus Ist-Wert und Idealwert bildet den Erfüllungsgrad *EG* eines Tertiärbefähigers $VBF_{3,i}$:

$$EG_{VBF3,i} = \frac{Ist_{VBF3,i}}{Ideal_{VBF3,i}} \tag{5.14}$$

Dabei wird durch die Festlegung, dass der Idealwert $Ideal_{VBF3,i}$ einem Erfüllungsgrad von 100 % entspricht, eine Normierung vorgenommen. Diese ermöglicht eine Aggregation der Erfüllungsgrade der unter einem Sekundärbefähiger zusammengefassten Tertiärbefähiger zu einem Sekundärbefähiger-Erfüllungsgrad $EG_{VBF2,j}$:

$$EG_{VBF2,j} = \frac{\sum_1^n EG_{VBF3,i}}{n} = \frac{\sum_1^n \frac{Ist_{VBF3,i}}{Ideal_{VBF3,i}}}{n} \tag{5.15}$$

mit *EG:* Erfüllungsgrad

$VBF_{2,j}$: Sekundärbefähiger j

$VBF_{3,i}$: Tertiärbefähiger i

n: Anzahl der Tertiärbefähiger eines Sekundärbefähigers

Ist: Ist-Wert

Ideal: Idealwert

Der Erfüllungsgrad eines Sekundärbefähigers gibt Auskunft darüber, inwiefern die aktuelle Ausprägung der unter diesem Sekundärbefähiger aufgeführten Tertiärbefähiger zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen geeignet ist.

Zum Vergleich der Erfüllungsgrade mehrerer Sekundärbefähiger bietet sich das Netzdiagramm an. In Abb. 5.15 ist dies beispielhaft für zehn Sekundärbefähiger dargestellt, wobei der Erfüllungsgrad des Idealwertes 100 % entspricht. Die Sekundärbefähiger, deren Erfüllungsgrad 80 % oder niedriger ist, sind grau hinterlegt.

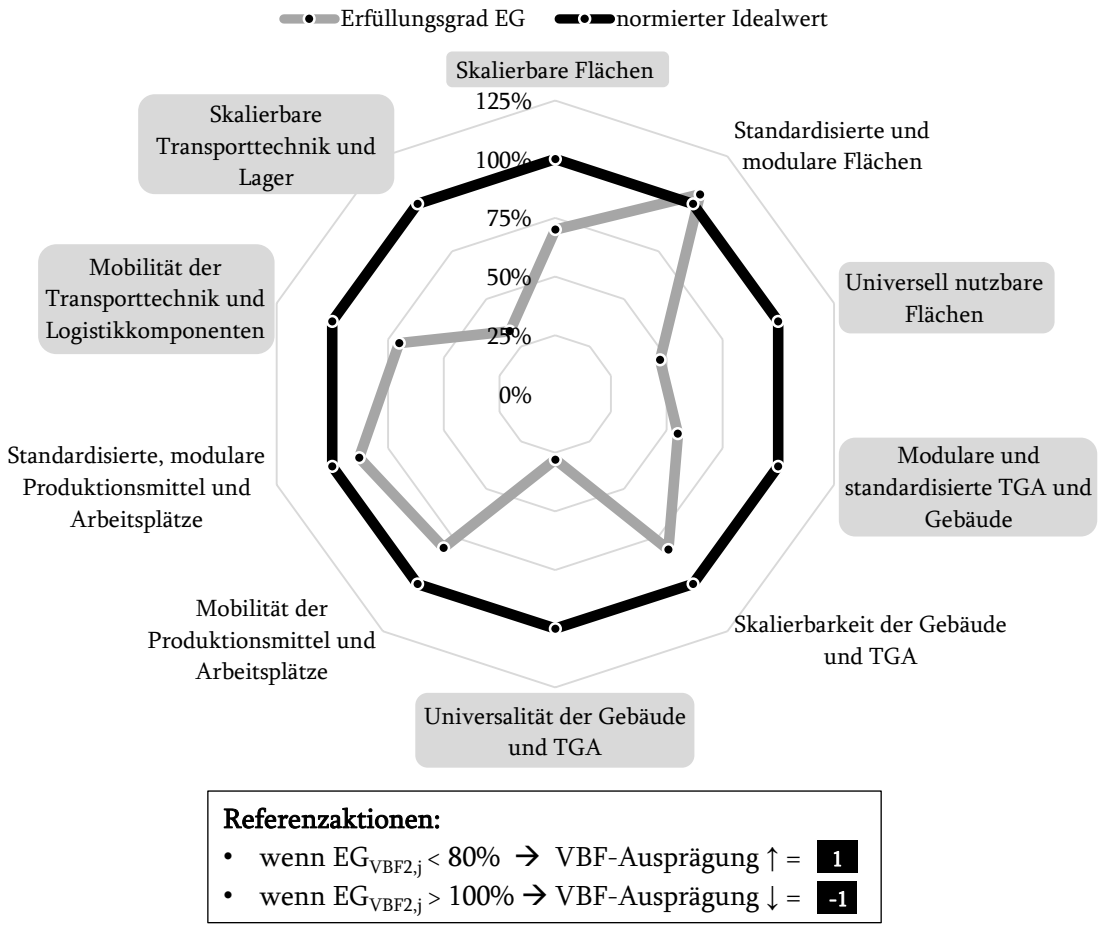


Abb. 5.15: Darstellung und Vergleich der Sekundärbefähiger-Erfüllungsgrade zur Ableitung von Referenzaktionen.

Es wird ersichtlich, dass gerade diese Befähiger ein Defizit hinsichtlich der Anforderung an die Kompensation der vorhandenen Unschärfen aufweisen und daher eine stärkere Ausprägung derselben erforderlich ist. Die geforderte Veränderung der Ausprägung eines VBF wird im Folgenden als *Referenzaktion* bezeichnet. Eine positive Referenzaktion wird mit „+1“ modelliert und entspricht einer Erhöhung der VBF-Ausprägung. Diese wird angestrebt, sofern der Erfüllungsgrad eines VBF kleiner als 80 % ist.[59] Eine negative Referenzaktion wird mit „-1“ modelliert und entspricht der Reduzierung der VBF-Ausprägung.

[59] In Anlehnung an die von HEGER (2007, S. 106) entwickelten Bewertungsklassen für die Soll-Ist-Differenz des Wandlungspotenzials eines Fabrikobjekts wird in dieser Arbeit ein Erfüllungsgrad von 80 % als Schwellwert für die Definition von Referenzaktionen herangezogen. Liegt ein Erfüllungsgrad größer als 80 % vor,

Diese Maßnahme ist erlaubt, sofern der Erfüllungsgrad eines VBF größer als 100 % ist und somit ein übermäßiges Veränderungspotenzial vorliegt.

Die im Anschluss durchzuführende Einflussanalyse der Veränderungsbefähiger verfolgt im Wesentlichen zwei Ziele:

1. Es sollen Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern identifiziert werden.
2. Auf Basis der Wirkbeziehungen und der ermittelten Referenzaktionen ist eine Bewertung hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit der einzelnen Tertiärbefähiger im Zusammenspiel mit den über Wirkbeziehungen in Verbindung stehenden anderen Befähigern durchzuführen.

Zunächst wird auf die empirische Erhebung von Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern detailliert eingegangen.

Empirisch-induktiver Teil:

Als Vorbild für das wissenschaftliche Vorgehen zur Ermittlung von Ursachen und Wirkungen innerhalb eines Systems wird das von WESTERMEIER (2016, S. 71-77) entwickelte Microsoft Excel® Werkzeug zur Wissensakquisition durch Expertenbefragung herangezogen. Dieses wurde als Methode entwickelt, um allgemeingültige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge in komplexen Prozessketten der Batteriefertigung aufzunehmen und zu bewerten, wobei die Aussagen der Experten mithilfe eines Microsoft Excel® Templates dokumentiert werden. Die Unterscheidung von Ursache und Wirkung, eine vorgegebene Gewichtungsskala für die Stärke der Wirkbeziehungen, die Angabe einer Selbsteinschätzung der Experten hinsichtlich der Bewertungssicherheit sowie die Möglichkeit einer Freitextbegründung der Bewertung sind Elemente, die aus dem von WESTERMEIER (2016, S. 71-77) entwickelten Werkzeug übernommen und für diese Arbeit adaptiert wurden. Das angepasste Erhebungswerkzeug für Wirkbeziehungen zwischen Veränderungsbefähigern ist schematisch in Abb. 5.16 dargestellt.

spricht HEGER (2007, S. 107) von einem „befriedigenden Wandlungspotential [bei dem; Anm. des Verfassers] Verbesserungen noch nicht unbedingt notwendig sind“.

Analyse Wirkzusammenhänge VBF_3 im Gestaltungsfeld Gebäude und TGA

Name/Funktion/Unternehmen

Name(n) Experte(n), Funktion, Unternehmen

Nr.	Befähiger	Wirkzusammenhang	Befähiger	Bewertung			Genaue Auswirkung
	Ursache (beeinflusst)	+++ stark positiv ++ mittel positiv + leicht positiv - leicht negativ - - mittel negativ - - - stark negativ	Auswirkung (wird beeinflusst)	Wirkbeziehung gestaltungsfeld-übergreifend x = ja	Sicherheit der Bewertung + = gering +++ = hoch	Investwirkung - = gering - - - = hoch	Begründung / Erläuterung
1	*VBF3,1*	- - - … +++	*VBF3,2*		+…+++	-…- - -	…
2	*VBF3,1*	- - - … +++	*VBF3,4*		+…+++	-…- - -	…
3	*VBF3,1*	- - - … +++	*VBF3,8*		+…+++	-…- - -	…
4	*VBF3,1*	- - - … +++	*VBF3,9*		+…+++	-…- - -	…
5	*VBF3,1*	- - - … +++	*VBF3,11*	x	+…+++	-…- - -	…
6	*VBF3,2*	- - - … +++	*VBF3,3*		+…+++	-…- - -	…
7	*VBF3,2*	- - - … +++	*VBF3,4*		+…+++	-…- - -	…
8	*VBF3,*		*VBF3,5*	x			

Abb. 5.16: Schematische Darstellung des Erhebungswerkzeugs für Wirkbeziehungen der Tertiärbefähiger (i. A. a. WESTERMEIER (2016, S. 73)).

Da der VBF-Referenzkatalog insgesamt 122 Tertiärbefähiger umfasst, ist eine Bewertung von allen möglichen 14.884 Wirkbeziehungen durch Experten nicht praktikabel. Aus diesem Grund wurden unplausible Wirkbeziehungen im Voraus eliminiert. Das verbleibende Wirkungsnetz wurde anschließend nach Fabrikgestaltungsfeldern (siehe Kap. 5.5.1) unterteilt. Die Wirkbeziehungen der in einem Gestaltungsfeld enthaltenen VBF wurden jeweils durch eine Gruppe von mindestens drei Personen, die bzgl. des spezifischen Gestaltungsfeldes eine besondere Kompetenz aufweisen, bewertet. Beispielsweise wurde die Bewertung der Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern im Gestaltungsfeld *Gebäude und technische Gebäudeausstattung* von Bauingenieuren, Architekten und Generalplanern, die im Bereich der Fabrikplanung tätig sind, vorgenommen.

Wie in Abb. 5.16 in der Spalte Ursache zu erkennen ist, kann ein Tertiärbefähiger mehrere andere Befähiger beeinflussen. Der jeweilige Wirkzusammenhang wird durch die Experten qualitativ bewertet. Dabei kommt eine sechsstufige Likert-Skala zum Einsatz, deren Ausprägungen von *stark negativ* bis *stark positiv* reichen. Diese Ausprägungen sind in Bezug auf die Wirkbeziehung zwischen zwei VBF in Tabelle 5.3 definiert (siehe auch HAWER ET AL. 2016B).

Tabelle 5.3: Definition der Bewertungskategorien für Wirkbeziehungen zwischen Tertiärbefähigern.

	Redundanz	Konstruktiver Aufwand	Limitierende Effekte
- - -	VBF sind redundant	Konstruktive Realisierung beider VBF extrem herausfordernd	Effekt eines VBF wird durch die Realisierung eines anderen VBF eliminiert
- -	VBF sind teilweise redundant	hoher Konstruktionsaufwand bei der Realisierung beider VBF	Effekt eines VBF wird durch die Realisierung eines anderen VBF stark eingeschränkt
-	VBF sind teilweise redundant, beeinflussen sich jedoch potentiell positiv	Konstruktionsaufwand bei Realisierung beider VBF leicht erhöht	Effekt eines VBF wird durch die Realisierung eines anderen VBF abgeschwächt
	Synergien / verstärkende Effekte		
+++	VBF verstärkt den Effekt eines anderen VBF signifikant, Realisierung beider VBF führt zu Synergieeffekten		
++	VBF verstärkt den Effekt eines anderen VBF		
+	VBF verstärkt den Effekt eines anderen VBF potentiell		

In Abb. 5.16 in der Spalte Wirkbeziehung gestaltungsfeldübergreifend wird vermerkt, wenn der beeinflusste VBF (Spalte Auswirkung) einem anderen Gestaltungsfeld zuzuordnen ist. Die Sicherheit des Experten bei der Bewertung des Wirkzusammenhangs wird mit *gering (+)* bis *hoch (+++)* dokumentiert. Durch die Abfrage einer allgemein negativen Investwirkung wird plausibilisiert, ob die genannten VBF der Spalte Ursache prinzipiell eine praktische Relevanz besitzen oder aufgrund einer zu hohen notwendigen Zusatzinvestition eher selten zum Einsatz kommen. Die Spalte Begründung/Erläuterung dient der Aufnahme zusätzlicher Informationen zur Bewertung der Wirkbeziehung durch den/die Experten in Form von Freitext.

Die Bewertung der Wirkbeziehungen erfolgte durch Workshops mit 15 Experten aus zehn Unternehmen. Bei der Auswertung der Ergebnisse dieser Workshops wurden nur die Beziehungen als gültig übernommen, bei denen mindestens 2/3 der Befragten eine Bewertung mit übereinstimmend positiver oder negativer Ausprägung vorgenommen haben und keine widersprüchlichen Aussagen (z. B. negative und positive Wirkbeziehungen) vorlagen.

Die erhobenen Informationen bzgl. der Wirkbeziehungen zwischen allen im Referenzkatalog aufgeführten Tertiärbefähigern können in einer sog. *Fuzzy Cognitive Map* visualisiert

werden. Eine Fuzzy Cognitive Map ist ein gerichteter und gewichteter Graph, bei dem Beziehungen zwischen den Systemelementen bzw. Knoten unscharf sind und der insbesondere für die Analyse von kausalen Abhängigkeiten und Wirkzusammenhängen geeignet ist (KOSKO 1986). Ein Ausschnitt der Fuzzy Cognitive Map der Tertiärbefähiger ist in Abb. 5.17 dargestellt.

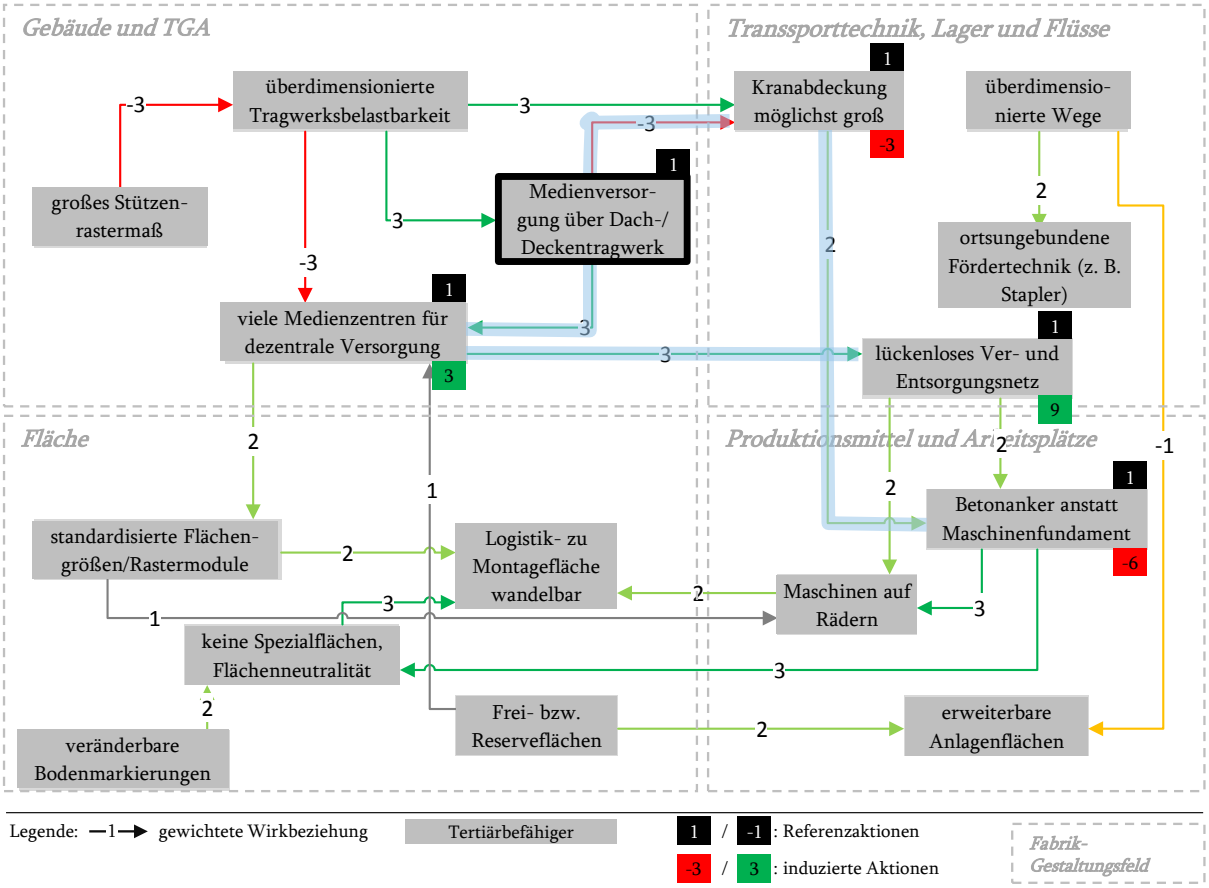


Abb. 5.17: Ausschnitt der Fuzzy Cognitive Map des Tertiärbefähiger-Wirkungsnetzes.

Um die im Folgenden erläuterte Einflussanalyse der Tertiärbefähiger durchzuführen, sollte die Gültigkeit der im Rahmen der empirischen Erhebung ermittelten Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern in dem spezifischen Planungsfall im Voraus durch die Planungsbeteiligten überprüft und die Fuzzy Cognitive Map entsprechend ergänzt oder reduziert werden.

Zum Zweck der Einflussanalyse wird eine Kennzahl, die sog. **Beeinflussungskennzahl** *BK*, entwickelt, die eine Aussage darüber zulässt, inwiefern eine Änderung eines Tertiärbefähigers die Änderungen anderer VBF im Wirkungsnetz in die richtige Richtung (hinsichtlich der jeweils geforderten Referenzaktion) fördert. Ziel dieses Schrittes ist es, alle rele-

vanten Tertiärbefähiger in einer Rangliste nach absteigender Beeinflussungskennzahl anzuordnen. Diese Rangliste wird im folgenden Kap. 5.6.2 verwendet, um die Prioritäten für die Aufnahme einzelner VBF in eine Kombination festzulegen, wobei eine hohe *BK* einer hohen Priorität entspricht.

Die Berechnung dieser Beeinflussungskennzahl für einen Tertiärbefähiger ist in Abb. 5.17 beispielhaft für den Tertiärbefähiger *Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk* dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Die Beeinflussungskennzahl bezieht sich immer auf genau einen Tertiärbefähiger, der für die Berechnung als Ausgangsbefähiger einer Wirkungskette angesehen wird. In dem in Abb. 5.17 angeführten Beispiel sei angenommen, dass die Referenzaktion aller beeinflussten VBF positiv und damit 1 ist. Die Beeinflussungskennzahl wird zunächst über zwei Stufen[60] des Wirkungsnetzes untersucht. Der Ausgangsbefähiger beeinflusst den Tertiärbefähiger *viele Medienzentren für dezentrale Versorgung* positiv (Gewichtung 3), die für diesen Befähiger induzierte Aktion ist daher ebenfalls positiv und wird mit einer dimensionslosen Kennzahl nach folgender Logik berechnet: *Referenzaktion Ausgangs-VBF x Gewichtung Wirkbeziehung x Referenzaktion beeinflusster VBF = 1 x 3 x 1 = 3.* Eine negative Wirkbeziehung, wie zwischen dem Ausgangsbefähiger und dem Tertiärbefähiger *Kranabdeckung möglichst groß*, führt zu einem negativen Effekt, da die Kranabdeckung lt. vorliegender Referenzaktion erhöht werden sollte. Dies wird jedoch durch die negative Wirkbeziehung und der ebenfalls positiven Referenzaktion des Ausgangsbefähigers erschwert. In der Beeinflussungskennzahl wird dieser Sachverhalt als negativ berücksichtigt, die induzierte Aktion für den Tertiärbefähiger *Kranabdeckung möglichst groß* wird wie folgt berechnet: *Referenzaktion Ausgangs-VBF x Gewichtung Wirkbeziehung x Referenzaktion beeinflusster VBF = 1 x (-3) x 1 = -3.*

Für die Berechnung der induzierten Aktionen der über mehrere Stufen beeinflussten Tertiärbefähiger werden analog zu den beiden aufgeführten Beispielen die induzierte Aktion vom vorhergehenden und die Gewichtung der Wirkbeziehungen vom vorhergehenden zum beeinflussten Befähiger mit dessen Referenzaktion multipliziert. Auf diese Weise berechnet sich die Kennzahl für die induzierte Aktion des Tertiärbefähigers *Lückenloses Ver-*

[60] Die Beeinflussungsstufe gibt die Anzahl der bei der Berechnung der Beeinflussungskennzahl berücksichtigten, durch Wirkbeziehungen nacheinander verknüpften VBF wieder. Beeinflusst der Ausgangsbefähiger einen weiteren VBF und dieser wieder einen weiteren, so ergibt sich bei Berücksichtigung beider Beziehungen die Beeinflussungsstufe zu 2. Werden eine weitere Beziehung und der im Wirkungsnetz folgende VBF einbezogen, ist die Beeinflussungsstufe 3 etc.

und Entsorgungsnetz zu *3 x 3 x 1 = 9.* Analog wird die Kennzahl des Tertiärbefähigers *Betonanker anstatt Maschinenfundament* zu *(-3) x 2 x 1 = -6* berechnet. Die Beeinflussungskennzahl für den Ausgangsbefähiger *Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk* wird durch die Summenbildung über die induzierten Aktionen der durch diesen beeinflussten Tertiärbefähiger im Wirkungsnetz ermittelt. Dieses Vorgehen lässt sich in folgendem Algorithmus zusammenfassen:

$$BK_{VBFi} = RefAkt_{Init} \sum_{l=1}^{m} \sum_{i_l=1}^{n_l} Akt_{l-1,n_{l-1}} \cdot Rel_{l-1,l} \cdot RefAkt_{l,i_l} \tag{5.16}$$

mit *BK:* Beeinflussungskennzahl

$Akt_{l-1,\,nl-1}$: induzierte Aktion des Tertiärbefähigers n_{l-1} in der Stufe $l-1$

$RefAkt_{l,nl}$: Referenzaktion des Tertiärbefähigers n_l in der Stufe l

$Rel_{l-1,l}$: gewichtete Wirkbeziehung zwischen VBF i und VBF $i+1$

Init: Index Ausgangsbefähiger

l: Index Beeinflussungsstufe Wirkungsnetz

m: Anzahl der Beeinflussungsstufen

i_l: Index des VBF in einer Beeinflussungsstufe des Wirkungsnetzes

n_l: Anzahl der VBF in einer Beeinflussungsstufe des Wirkungsnetzes

Für das in Abb. 5.17 angeführte Beispiel ergibt sich eine Beeinflussungskennzahl von *(-3) + (-6) + 3 + 9 = 3.* Je größer die Beeinflussungskennzahl eines Tertiärbefähigers, desto besser harmoniert dieser mit den anderen Tertiärbefähigern im Wirkungsgefüge unter Berücksichtigung der jeweiligen vorgegebenen Referenzaktionen. Die Beeinflussungskennzahl lässt sich für eine vorliegende Fuzzy Cognitive Map mit gewichteten Wirkbeziehungen und Referenzaktionen automatisiert für jeden enthaltenen Tertiärbefähiger berechnen.

Zusammenfassend führt das in diesem Kapitel erläuterte Vorgehen zu folgenden Ergebnissen:

- Für jeden Tertiärbefähiger wurde ein Erfüllungsgrad ermittelt, auf dessen Basis eine Referenzaktion abgeleitet wird.
- Die Wirkbeziehungen zwischen Tertiärbefähigern wurden im Rahmen von Expertenworkshops identifiziert und in einer Fuzzy Cognitive Map dokumentiert.
- Als Gütemaß für das positive Zusammenwirken der Tertiärbefähiger in einem Wirkungsnetz bezogen auf die Referenzaktion eines Ausgangsbefähigers wird für jeden

VBF eine Beeinflussungskennzahl berechnet. Das Ergebnis dieses Kapitels ist somit eine Rangliste aller relevanten Tertiärbefähiger nach ihrer Beeinflussungskennzahl.

5.6.2 Kombination von Veränderungsbefähigern zu alternativen Fabrikstrukturvarianten

Ziel dieses Kapitels ist es, eine Teilmethode zur systematischen Kombination der Veränderungsbefähiger zu entwickeln. Der Vorgang erfolgt auf Basis der in den Kapiteln 5.5.2 und 5.6.1 erzielten Ergebnisse und Informationen. Das entwickelte Vorgehen stellt einen Leitfaden für die Kombination der für den spezifischen Planungsfall als relevant identifizierten Tertiärbefähiger unter Berücksichtigung der erforderlichen Referenzaktionen, der ermittelten Beeinflussungskennzahlen, der Erfüllungsgrade und damit auch der vorhandenen Unschärfen dar. Die Festlegung der Ausprägungen der Tertiärbefähiger erfolgt ebenfalls im Rahmen der Methode. Als Ergebnis entstehen unterschiedliche alternative VBF-Kombinationen, die in alternativen Fabrikstrukturvarianten konkretisiert werden.

In Abb. 5.18 ist der Leitfaden zur Entwicklung alternativer VBF-Kombinationen im Rahmen eines Expertenworkshops dargestellt. Zunächst werden mögliche Fabrikgrundrisse erarbeitet, die als alternative Gebäudeformen die Grundlage für die Alternativenbildung darstellen. Für diesen Schritt ist die Durchführung einer Best-Practice-Analyse empfehlenswert, um bereits vorhandenes Wissen in die Grundrisserzeugung einzubeziehen. In den folgenden Schritten wird sukzessive geprüft, inwiefern unterschiedliche VBF in den alternativen Gebäudegrundrissen realisierbar sind. Dazu wird die Rangliste, in der die VBF nach absteigender Beeinflussungskennzahl *BK* angeordnet sind, verwendet (Ergebnis aus Kap. 5.6.1). Zunächst wird für den VBF mit der höchsten BK die Realisierbarkeit (realisierbar oder nicht realisierbar) durch die Experten bewertet. Ist eine grundsätzliche Realisierbarkeit gegeben, erfolgt eine Detaillierung auf Basis der Stufen *schlecht (-), mittel (0)* und *gut realisierbar (+)*. Diese Bewertung wird als Grundlage für die spätere Festlegung der VBF-Ausprägungen in jeder Kombination herangezogen. Im anschließenden Schritt wird der betrachtete VBF *i* aus der Liste 1 entfernt und in eine Liste 2 eingefügt (Abb. 5.18). Sofern noch VBF in Liste 1 verblieben sind, wird der beschriebene Prozess für alle weiteren VBF so lange iterativ durchgeführt, bis die Liste 1 leer ist.

Im nächsten Schritt werden für die Bildung von VBF-Kombinationen durch die Planungsbeteiligten ein oder mehrere Abbruchkriterien festgelegt, welche die Bedingungen für die

Beendigung des iterativen Vorgehens der VBF-Kombination festlegen. Typische Abbruchkriterien sind eine bestimmte Anzahl von VBF in der Kombination, das Verhältnis von positiven zu negativen Wirkbeziehungen in der VBF-Kombination oder der sog. **Kompensationsgrad** *KG*. Der Kompensationsgrad berechnet sich nach Formel (5.18) aus den Erfüllungsgraden der Sekundärbefähiger und gibt Auskunft darüber, wie gut die vorhandenen Unschärfen der Planungsparameter durch die ausgewählten VBF und deren Ausprägungen in einer Kombination k kompensiert werden können. Der Kompensationsgrad ist damit eine wichtige Zielgröße bei der Kombination von VBF.

Das in Abb. 5.18 skizzierte Vorgehen legt einige Annahmen zugrunde, die eine systematische Kombination der VBF ohne genaue Kenntnis der mit den jeweiligen VBF und deren Ausprägungsgraden einhergehenden Kosten ermöglichen. Diese Annahmen sind:

1. Die Investitions- bzw. Betriebskosten einer Kombination steigen, wenn die Ausprägungen der VBF erhöht werden.
2. Die Investitions- bzw. Betriebskosten einer Kombination steigen, wenn die Anzahl der VBF steigt.
3. Die Kosten einer Kombination sinken, wenn das Verhältnis aus positiven zu negativen Wirkbeziehungen innerhalb der VBF-Kombination steigt.
4. Je größer der Kompensationsgrad einer VBF-Kombination, desto besser werden die vorhandenen Unschärfen kompensiert.

Die Unterscheidung nach Investitions- und Betriebskosten bei Annahme 1 und 2 geht mit der Art der VBF einher: Wird die Ausprägung eines VBF, der Flexibilität fördert, erhöht, so ist prinzipiell mit höheren Investitions- und Betriebskosten zu rechnen. Diese entstehen durch die initiale Überdimensionierung bestimmter struktureller Aspekte und das damit einhergehende Vorhalten ggf. nicht benötigter Kapazitäten (z. B. im Falle überdimensionierter Flächen bzw. Reserveflächen). Fördert der VBF hingegen Wandlungsfähigkeit, werden höhere Investitionskosten in Kauf genommen, um durch eine spätere Aktivierung des VBF Umbaukosten zu verringern. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn die konstruktive Trennung von Gebäudetragwerk und -hülle eine spätere Erweiterung einer Halle vereinfacht, dieser VBF jedoch zunächst höhere Investitionskosten hervorruft.

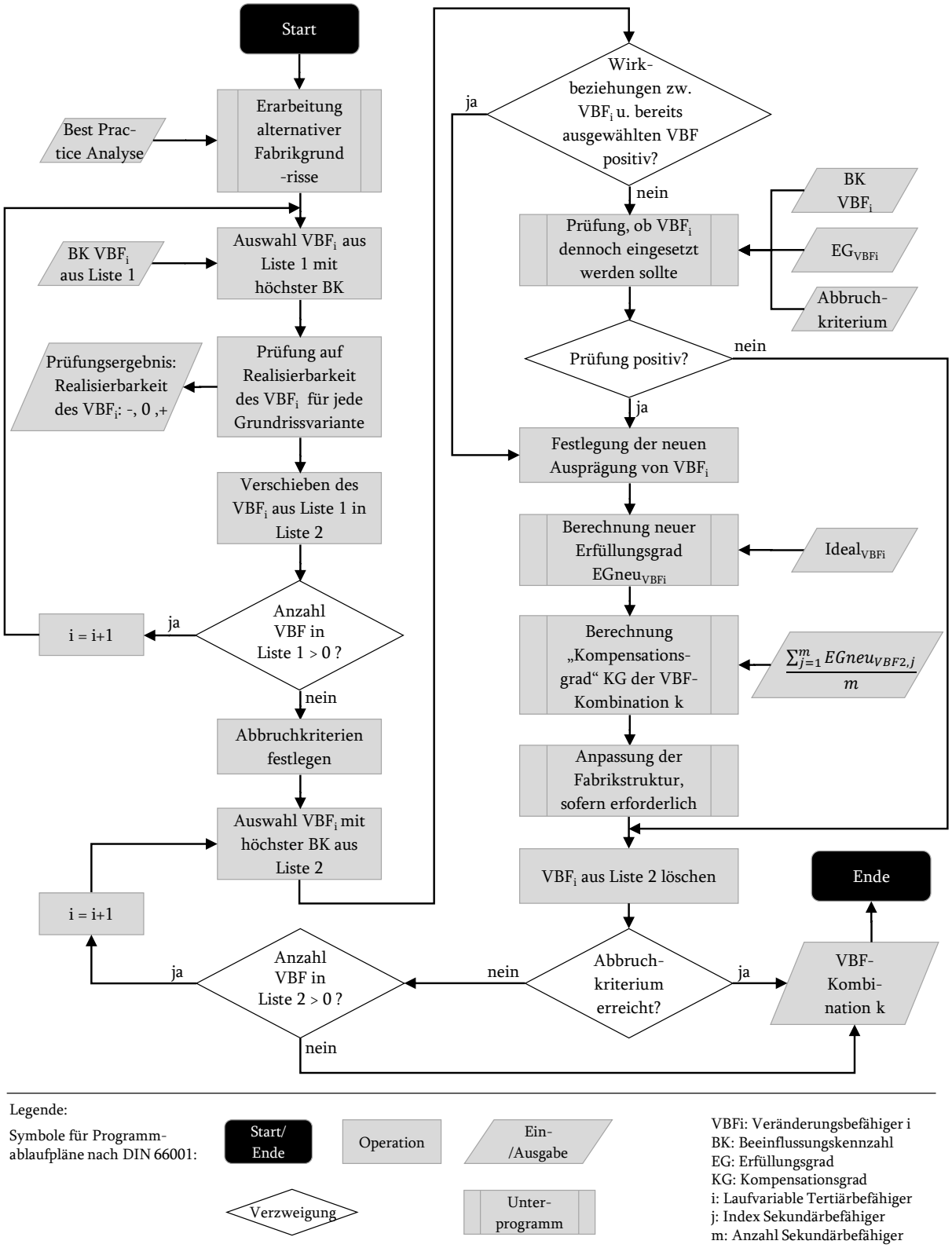


Abb. 5.18: Leitfaden zur Entwicklung alternativer VBF-Kombinationen im Rahmen eines Expertenworkshops.

Nach der Festlegung der Abbruchkriterien wird zunächst der erste VBF aus der Liste 2 mit der höchsten Beeinflussungskennzahl ausgewählt. In der folgenden Verzweigung wird

überprüft, ob zwischen dem aktuellen VBF i (i stellt in dem Leitfaden die mit jeder Iteration um 1 erhöhte Laufvariable als Index eines VBF dar) und den bereits vorhandenen VBF in der Kombination ausschließlich positive Wirkbeziehungen vorliegen. Ist dies der Fall, wird mit der Festlegung des Ausprägungsgrades des VBF i auf Basis der vorhandenen Unschärfen und der Ausprägung der anderen bereits vorhandenen VBF in der Kombination (Berücksichtigung von Synergieeffekten etc.) fortgefahren. Liegt mindestens eine negative Wirkbeziehung vor, wird in einem anschließenden Schritt geprüft, ob der betrachtete VBF i trotzdem in die Kombination aufgenommen werden sollte. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn sein Erfüllungsgrad größer als 1 und damit die Referenzaktion negativ ist, dieser VBF also in seiner Ausprägung verringert werden darf. In diesem Fall kann der VBF i trotz negativer Wirkbeziehungen zu anderen VBF in die Kombination aufgenommen werden, da eine geringere Ausprägung und damit eine Abschwächung des VBF i in Kauf genommen werden kann, ohne Nachteile für die Unschärfekompensation zu erzeugen. Auch eine hohe Beeinflussungskennzahl stellt ein Kriterium dar, das den Einbezug eines VBF in die Kombination fördert, da der VBF offensichtlich nur über wenige negative, gleichzeitig aber über viele positive Beziehungen in das Wirkungsnetz eingebunden ist. Die Entscheidung, ob ein VBF trotz negativer Wirkbeziehungen in eine Kombination aufgenommen wird, obliegt letztendlich den am Workshop beteiligten Experten.

Ist das Prüfungsergebnis negativ (VBF soll nicht in die Kombination aufgenommen werden), wird dieser aus der Liste 2 entfernt. Liegt ein positives Prüfungsergebnis vor, wird im nächsten Schritt die Festlegung der Ausprägung des VBF i auf Basis der vorhandenen Unschärfen und der bereits in der Kombination vorhandenen VBF durch die Experten vorgenommen.

Nach der Festlegung der Ausprägung des VBF i wird der neue Erfüllungsgrad $EGneu_{VBFi}$ unter Verwendung der neuen Ausprägung $Plan_{VBFi}$ und des Idealwertes $Ideal_{VBFi}$ berechnet:

$$EGneu_{VBFi} = \frac{Plan_{VBFi}}{Ideal_{VBFi}} \tag{5.17}$$

Der neue Erfüllungsgrad $EGneu_{VBFi}$ fließt im nächsten Schritt in die Berechnung des durchschnittlichen Kompensationsgrades KG_k der bisher bestehenden VBF-Kombination k ein.

Der durchschnittliche Kompensationsgrad aggregiert die Erfüllungsgrade aller Sekundärbefähiger j nach folgender Formel, wobei m die Gesamtzahl der in der Kombination k vorhandenen Sekundärbefähiger ist:

$$KG_k = \frac{\sum_{j=1}^{m} EGneu_{VBF2,j}}{m} \tag{5.18}$$

Ist die Neuberechnung des Kompensationsgrades abgeschlossen, erfolgt anschließend eine Anpassung der Fabrikstruktur auf Basis des jeweiligen Fabrikgrundrisses. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Ausprägung der VBF in jedem Fabrikgrundriss einen anderen Wert, bis hin zur Vernachlässigung des VBF (Ausprägung = 0), annehmen kann. Durch diese Variation werden im Laufe des in Abb. 5.18 dargestellten iterativen Leitfadens sukzessive alternative Fabrikstrukturvarianten gebildet. Die Ergänzung und Anpassung der jeweiligen Fabrikstrukturvarianten erfolgen somit unter schrittweiser Hinzunahme und Bestimmung der Ausprägung jeweils eines weiteren VBF iterativ. Ist ein VBF i und dessen Ausprägung bereits bearbeitet worden, wird dieser aus der Liste 2 entfernt. Anschließend folgt eine Überprüfung, ob das zuvor festgelegte Abbruchkriterium (z. B. Anzahl der VBF in einer Kombination) erreicht wurde. Ist dies der Fall, wird als Ergebnis die VBF-Kombination k ausgegeben. Andernfalls wird geprüft, ob in der Liste 2 weitere VBF vorhanden sind. Ist die Liste leer, so wird ebenfalls die VBF-Kombination k als Ergebnis ausgegeben und der Prozess endet. Sind weitere VBF in Liste 2 vorhanden, wird die Laufvariable i um 1 erhöht und der nächste VBF i bzgl. der Aufnahme in die Kombination k in einer weiteren Iteration untersucht und ggf. eine Ausprägung bestimmt.

Durch die Festlegung unterschiedlicher Fabrikgrundrisse, der Variation der Abbruchkriterien sowie der Ausprägung der in die Kombination aufgenommenen VBF werden alternative VBF-Kombinationen erzeugt, die Fabrikstrukturvarianten darstellen und deren individuelle Eigenschaften zu Vor- und Nachteilen führen, die im Rahmen einer Bewertung (Kap. 5.7) näher untersucht werden.

Zusammenfassend führt das in diesem Kapitel erläuterte Vorgehen zu folgenden Ergebnissen:

- Mithilfe eines Leitfadens zum Vorgehen der VBF-Kombination im Rahmen eines Expertenworkshops werden sinnvolle alternative VBF-Kombinationen gebildet.

Dabei werden die VBF in einem iterativen Vorgehen in unterschiedliche Fabrikstrukturvarianten integriert.

- Zur Quantifizierung der durchschnittlichen Unschärfekompensation einer VBF-Kombination wird ein sog. Kompensationsgrad als Kennzahl eingeführt, der einen Vergleich der unterschiedlichen Fabrikstrukturalternativen zulässt.

5.7 Schritt 6: Bewertung der Veränderungsbefähiger-Kombinationen

Die in Kap. 5.6.2 gebildeten Fabrikstrukturvarianten werden in einem letzten Schritt der entwickelten Methode bewertet. Dazu wird zunächst eine Bewertungsmethode aus Bausteinen bereits vorhandener Ansätze zusammengeführt (Kap. 5.7.1). In Kap. 5.7.2 wird auf Basis der Bewertungsergebnisse eine Zuordnung der alternativen Fabrikstrukturvarianten zu Veränderungsstrategien vorgenommen, um die Entscheidung zur Umsetzung einer der Varianten zu unterstützen.

5.7.1 Bewertung der alternativen Fabrikstrukturvarianten

Da der Fokus dieser Arbeit nicht auf der Entwicklung einer Bewertungsmethode liegt, werden Bausteine der vorhandenen Verfahren nach HEGER (2007) und KREBS (2012) (siehe Kap. 3.3) verwendet. Die Bewertungsmethode nach HEGER (2007) zeichnet sich dadurch aus, dass die Bewertung von Fabrikstrukturvarianten ausschließlich deren Unterschiede hinsichtlich Veränderungsfähigkeit und die damit verbundenen monetären Größen berücksichtigt. Diese Informationen sind für einen Vergleich der Alternativen ausreichend und verringern den Datenerhebungsaufwand (HEGER 2007, S. 122). Aus der von KREBS (2012) entwickelten Methode wird der Einsatz der Monte-Carlo-Simulation für die Berücksichtigung unscharfer monetärer Einflussgrößen übernommen. Durch die Kombination der beiden Verfahren entsteht eine aufwandsarme Bewertungsmethode für alternative veränderungsfähige Fabrikstrukturvarianten, bei der Unschärfen berücksichtigt werden. Das entstandene Bewertungsvorgehen ist in Abb. 5.19 dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Die Bewertung erfolgt auf Basis von drei Säulen: In der ersten Säule *Veränderungspotenzialanalyse* wird untersucht, inwiefern die unterschiedlichen Varianten mit ihren jeweiligen Veränderungsbefähigern und deren Ausprägungsgraden die vorhandenen Unschärfen kompensieren und somit ein Veränderungspotenzial darstellen. Zu diesem Zweck werden

die in Kap. 5.7 bereits ermittelten Kompensationsgrade herangezogen, die durch die Aggregation der Erfüllungsgrade der VBF berechnet werden (Formel (5.17) und (5.18)).

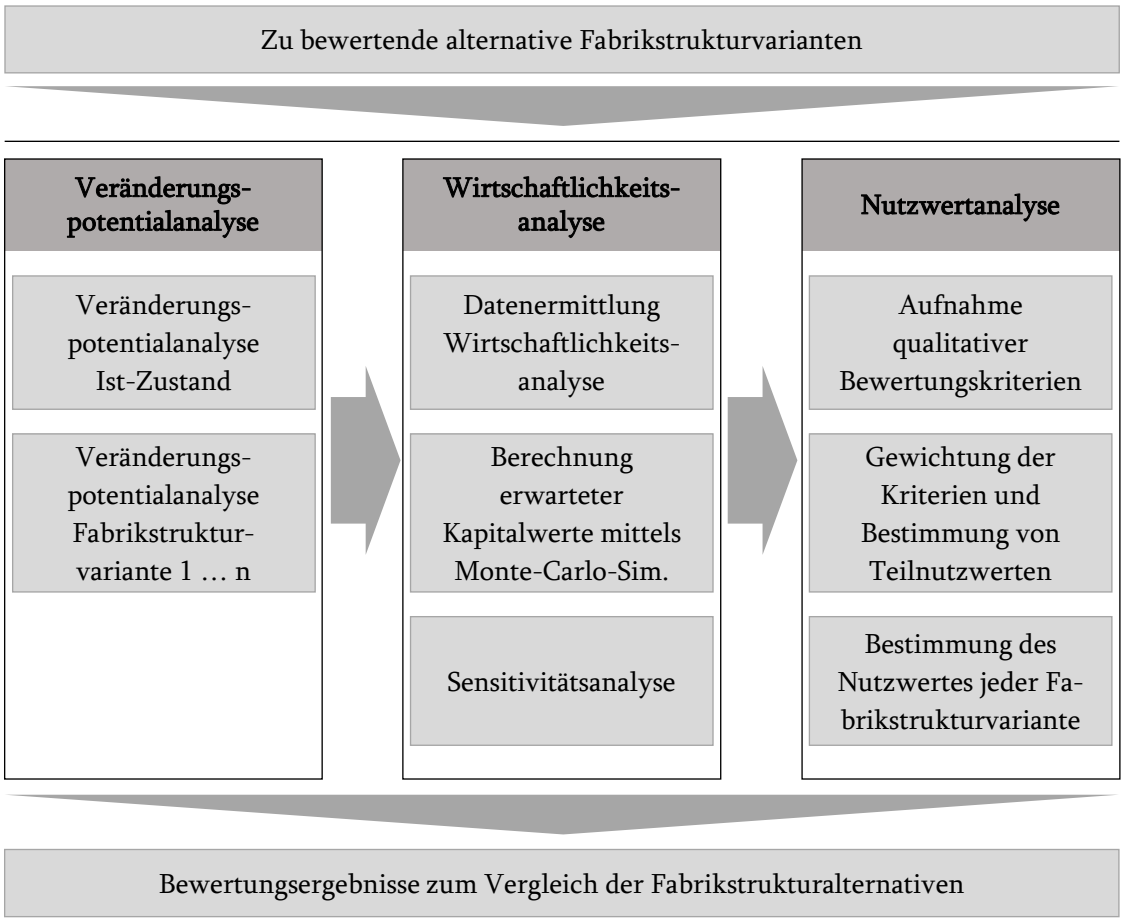


Abb. 5.19: Vorgehen zur Bewertung der alternativen Veränderungsbefähiger-Kombinationen.

Die Säule *Wirtschaftlichkeitsanalyse* umfasst die monetäre Bewertung der Fabrikstrukturalternativen. Zu diesem Zweck müssen im Rahmen der Datenermittlung zunächst die monetären Einflussgrößen sowie Informationen zu den voraussichtlichen zukünftigen Veränderungen der Fabrik erhoben werden. In Anlehnung an HEGER (2007, S. 121-125) sind die in Tabelle 5.4 aufgeführten Informationen bzw. Daten zu erheben.

Auf Basis der ermittelten Veränderungsprozesse, deren Intensität und Häufigkeit sowie der mit diesen einhergehenden Zahlungsreihen wird der Kapitalwert jeder Strukturalternative berechnet. Dabei kommt, wie in KREBS (2012, S. 120-122) beschrieben, die Monte-Carlo-Simulation zur Berücksichtigung der Unschärfen in den monetären Einflussgrößen und damit auch im berechneten Kapitalwert zum Einsatz. Eine anschließende Sensitivitätsanalyse gibt Aufschluss über die relativen Anteile der Einflussfaktoren an der Unschärfe des Kapitalwertes (KREBS 2012, S. 127-129).

Tabelle 5.4: Datenermittlung Wirtschaftlichkeitsanalyse nach HEGER (2007, S. 121-125).

Nr.	Daten/Information	Beschreibung/Beispiele
1	Betrachtungszeitraum	Zeitraum, für den die Fabriknutzung vorausgeplant ist, z.B. 20 Jahre
2	Veränderungsprozesse	Geplante Veränderungsmaßnahmen, z.B. Erweiterung eines Hallenflügels, Umbau der Schwenkmontage
3	Änderungsintensität	Ausprägung/Umfang der Veränderungsmaßnahmen, z.B. Erweiterung der Schwenkmontage um 3 Takte
4	Änderungshäufigkeit	Häufigkeit des Auftretens der Veränderungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten, z.B. jährlich, einmalig mit 50% Wahrscheinlichkeit
5	Zahlungsreihen	Investitionskosten, Betriebskosten, Umbaukosten und deren Unschärfen z.B. 3 Mio. EUR, 100.000 EUR jährlich
6	Kalkulationszinssatz	Betriebsinterner Zinssatz und dessen Unschärfe z.B. 8%

Die dritte Säule der Bewertungsmethode ist eine Nutzwertanalyse i. A. a. HEGER (2007, S. 128-130), bei der qualitative Kriterien der unterschiedlichen Fabrikstrukturvarianten bewertet und verglichen werden. Beispiele qualitativer Kriterien sind die *Kompaktheit des Layouts*, die *Erfüllung von Anforderungen der Logistik* oder die *kommunikationsfördernde Anordnung der Sozialflächen.* Dabei ist zu beachten, dass Kriterien, die direkt oder indirekt in der Veränderungspotenzialanalyse oder der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt werden, nicht als qualitatives Kriterium in der Nutzwertanalyse bewertet werden können (HEGER 2007, S. 128). Die Nutzwertanalyse umfasst, wie in HEGER (2007, S. 48-49) beschrieben, die Schritte Bestimmung der Bewertungskriterien, Gewichtung der Kriterien, Bestimmung der Teilnutzwerte und Ermittlung des Nutzwertes jeder Fabrikstrukturvariante (Abb. 5.19).

5.7.2 Zuordnung der Fabrikstrukturvarianten zu Veränderungsstrategien

Eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Erweiterung zur vorhandenen Methode stellt die Einordnung der zu bewertenden Varianten anhand ihrer monetären Größen in den sog. **Veränderungsfähigkeits-Würfel** (Abb. 5.20) dar. Das Verhältnis von Investitions-, Betriebs- und Umbaukosten zueinander lässt einen Schluss auf die Veränderungsstrategie zu, die der jeweiligen Variante primär zuzuordnen ist. So führt eine primär flexible Fa-

brikstruktur zu entweder hohen Investitions- oder Betriebskosten aufgrund der vorzuhaltenden Aktionskorridore (siehe Kap. 2.1.3 und 5.6.2). Sofern eine Veränderung einer flexiblen Struktur durch die vorgehaltene Flexibilität abgedeckt werden kann und sich somit innerhalb der vorgehaltenen Korridore vollzieht, sind die Umbaukosten gering. Geht eine Veränderung über die Aktionskorridore hinaus, sind die Umbaukosten hoch (Abb. 5.20, Oktant 4 und Oktant 7).

Bei einer Fabrikstrukturvariante, in der viele VBF zur Förderung der Wandlungsfähigkeit umgesetzt sind, werden auch die Investitionskosten oder, in selteneren Fällen, die Betriebskosten hoch sein. Ein Umbau kann aufgrund der Möglichkeit zur Aktivierung von Wandlungspotenzialen (siehe Kap. 2.1.3 und 5.6.2) kostengünstig erfolgen (Abb. 5.20, Oktant 1 und Oktant 6). Sind sowohl Investitions- als auch Betriebskosten erhöht, die Umbaukosten jedoch sehr gering, ist eine Kombination von VBF vorhanden, die z. T. Flexibilität, z. T. Wandlungsfähigkeit fördern (Abb. 5.20, Oktant 2).

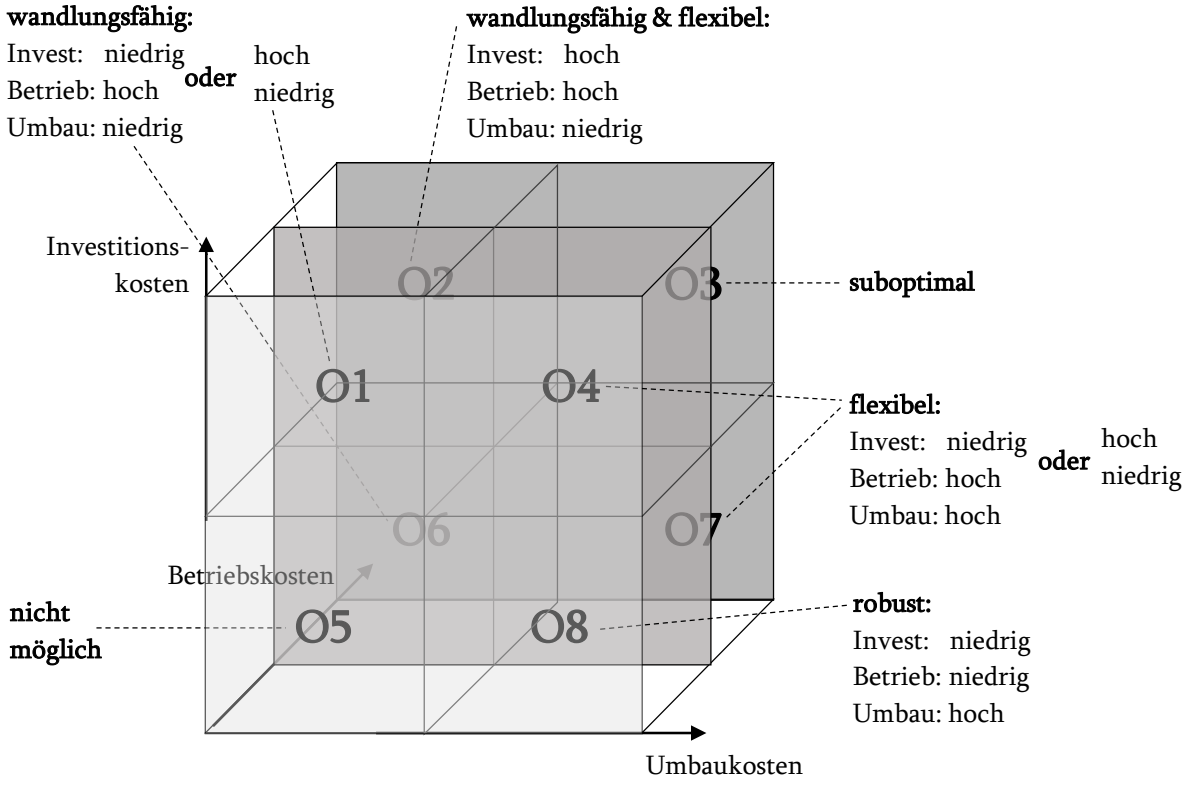


Abb. 5.20: Veränderungsfähigkeits-Würfel für die Zuordnung der Fabrikstrukturvarianten zu Veränderungsstrategien.

Eine robuste Fabrikstruktur hingegen verursacht aufgrund ihrer Unveränderlichkeit geringe Investitionskosten und eher geringe Betriebskosten, da keine breiten Aktionskorridore und damit keine Überkapazitäten vorgehalten werden. Allerdings muss die Fa-

brikstruktur für den Betrieb unter in bestimmtem Maße variierenden Umweltbedingungen geeignet sein (siehe Kap. 2.1.3). Sollte ein – im Design der robusten Fabrik nicht vorgesehener – Umbau trotzdem erforderlich sein, führt dies zu hohen Umbaukosten (Abb. 5.20, Oktant 8).

Durch Auftragen der Investitions-, Betriebs- und Umbaukosten auf den Achsen eines dreidimensionalen Koordinatensystems lässt sich der Veränderungsfähigkeits-Würfel aufspannen und die Bereiche der Wandlungsfähigkeit, Flexibilität und Robustheit lassen sich approximativ darstellen (Abb. 5.20).

Die Bereichsgrenzen sind dabei als fließend zu betrachten, eine scharfe Abgrenzung der Oktanten ist nicht möglich und die Zuordnung der VBF-Kombinationen zu Veränderungsstrategien erlaubt lediglich eine relative, jedoch keine absolute Aussage. Das Ergebnis dieser Zuordnung könnte beispielsweise lauten: Variante 1 ist eher der Veränderungsstrategie Flexibilität zuzuordnen, während Variante 2 eher eine robuste Fabrikstruktur erzeugt. Somit können nach der Datenerhebung und der Wirtschaftlichkeitsanalyse die unterschiedlichen Alternativen im Würfel angeordnet und dies als Entscheidungsunterstützung zur Umsetzung einer Veränderungsstrategie herangezogen werden.

Bewertungsergebnisse		**Variante 1**	**Variante 2**	**Variante 3**
Veränderungs-potentialanalyse	Kompensationsgrad			
Wirtschaftlich-keitsanalyse	Erwarteter Kapitalwert & Standardabweichung			
	Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse			
	Einordnung in den Veränderungs-fähigkeits-Würfel			
Nutzwertanalyse	Nutzwert			

Abb. 5.21: Schematische Übersicht der Bewertungsergebnisse (i. A. a. HEGER 2007, S. 129).

Die Ergebnisse der Bewertung der Fabrikstrukturvarianten und damit der Veränderungsbefähiger-Kombinationen können, wie in Abb. 5.21 gezeigt, schematisch dargestellt werden. Dabei ist zu beachten, dass die einzelnen Bewertungsergebnisse nicht miteinander verrechnet, sondern, wie von HEGER (2007, S. 129) beschrieben, als Einzelergebnisse betrachtet werden, da mögliche Abhängigkeiten zwischen den Säulen der Bewertung bei einer Aggregation den Gesamtergebniswert verfälschen würden.

5.8 Fazit

Die in Kap. 5.2 und 5.4 vorgestellte Teilmethode beantwortet die Forschungsfrage F1 (Wie können die Auswirkungen unscharfer Daten im Fabrikplanungsprozess analysiert werden?): Mithilfe des entwickelten Ansatzes zur Modellierung spezifischer Planungsprozesse unter Einbezug der Planungsdaten können durch die Anwendung der beschriebenen Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern im Planungsprozess untersucht werden (Kap. 5.2). Die Auswirkungen unscharfer Daten werden mithilfe der Klassifizierung unterschiedlicher Arten von Wirkungsgefügen und den jeweils relevanten Unschärfefortpflanzungsmechanismen analysiert (Kap. 5.4.1).

Die in Kap. 5.3 erarbeitete Teilmethode gibt eine Antwort auf die Forschungsfrage F2 (Wie lässt sich die Unschärfe der Daten bzw. Parameter anwendungsorientiert klassifizieren und modellieren?): Mithilfe des vorgestellten Leitfadens können Anwender Unschärfen modellieren und klassifizieren. Die Bestimmung von Unschärfen abhängiger Parameter wird in Kap. 5.4.1 thematisiert.

Die in Kap. 5.5 vorgestellte Teilmethode beantwortet die Forschungsfrage F3 (Wie können die für die Kompensation vorhandener Unschärfen geeigneten VBF identifiziert werden?): Dazu wurde ein umfassender Referenzkatalog der Tertiärbefähiger entwickelt, der die Grundlage für die Auswahl geeigneter VBF darstellt. Um das Kompensationspotenzial der VBF zu untersuchen, wurde eine Onlineumfrage durchgeführt, deren Ergebnisse für die Teilmethode zur gezielten Auswahl bestimmter VBF für die Kompensation der vorhandenen Unschärfen herangezogen werden.

Die Teilmethode zur Einflussanalyse (Kap. 5.6.1) und das sich anschließende Vorgehen zur Bildung von VBF-Kombinationen (Kap. 5.6.2) geben Antworten auf die Forschungsfrage F4

(Wie lassen sich VBF unter Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zu einer Fabrikstrukturvariante kombinieren?) Zu diesem Zweck wird eine Kennzahl entwickelt, die beschreibt, wie gut ein VBF mit den anderen im Wirkungsnetz vorhandenen VBF harmoniert (sog. Beeinflussungskennzahl *BK*). Ein Vorgehensmodell, das die Anwender bei der gezielten Kombination der VBF zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen im Rahmen eines Workshops unterstützt, ermöglicht die Bildung alternativer Fabrikstrukturvarianten durch den Einsatz der VBF.

6 Anwendung und Bewertung der Methode

Zur Evaluierung und Validierung der entwickelten Methode wird diese in einem realen industriellen Fallbeispiel angewendet. Dieses wird in Kap. 6.1 vorgestellt und erläutert. Im anschließenden Kap. 6.2 werden die Anwendungsergebnisse detailliert und die entwickelten Softwarewerkzeuge zur Anwendungsunterstützung kurz im Kontext des behandelten Fallbeispiels präsentiert. In Kap. 6.3 wird der Aufwand der Anwendung untersucht und dem Nutzen im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse gegenübergestellt. Eine umfassende Bewertung und Diskussion der Methode hinsichtlich der in Kap. 4 definierten Anforderungen erfolgt in Kap. 6.4.

6.1 Einführung in den Anwendungsfall

Die Anwendung der entwickelten Methode erfolgt in der Strukturplanung für das neue Automobilwerk der BMW Group in San Luis Potosí, Mexiko. Die BMW Group ist ein deutscher Premiumautomobilhersteller mit Hauptsitz in München. Im Jahr 2017 lieferte das Unternehmen weltweit rund 2.464.000 Fahrzeuge der Marken BMW, Mini und Rolls Royce aus und erzielte einen Umsatz von ca. 99 Mrd. Euro. Der Jahresüberschuss betrug 8,7 Mrd. Euro (BMW GROUP 2018, S. 4-5). Die Fahrzeuge der BMW Group werden in 19 Werken in Europa, Amerika, Asien und Afrika produziert (BMW GROUP 2018, S. 26). Ein weiteres Werk im mexikanischen Bundesstaat San Luis Potosí ist derzeit in Planung. Die Produktion der 3er-Baureihe wird dort im Jahr 2019 starten, wobei zunächst eine Ausbringung von 150.000 Einheiten jährlich angestrebt wird (BMW GROUP 2016). In den Neubau des Greenfield-Werks investiert BMW etwa 1 Mrd. US-Dollar. Bei der Planung des BMW-Werks Mexiko steht die Veränderungsfähigkeit im Fokus: Die Werkstrukturen sollen so ausgelegt werden, dass eine stufenlose Erhöhung der Kapazität auf zukünftig 300.000 Einheiten pro Jahr möglich ist (VOLK 2016). Des Weiteren sollen laut Werkleiter Hermann Bohrer „neue Derivate und gegebenenfalls erforderliche Erweiterungen […] innerhalb von drei Wochen in den Fertigungsfluss“ integriert werden können (VOLK 2016). Die Anwendung der Methode erfolgt in zwei Stufen: Zunächst werden die wesentlichen Unschärfen innerhalb des

Planungsprozesses identifiziert. Grundlage für diesen Schritt bildet ein bereits vorhandenes Phasenmodell, das den Planungsprozess für die Automobilmontage bei BMW mit allen relevanten Phasen, Meilensteinen und Planungsparametern abbildet. Die für die Strukturplanung relevanten Planungsparameter sowie deren Unschärfen werden identifiziert und mithilfe der im Rahmen von Kap. 5.2 bis 5.4 vorgestellten Methode modelliert. Anschließend erfolgt die Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis dieser Unschärfen unter Anwendung der in Kap. 5.5 bis 5.7 entwickelten Ansätze. Im Folgenden wird das Vorgehen unter Verwendung der anwendungsunterstützenden Werkzeuge näher erläutert.

6.2 Anwendung der Methode

In diesem Kapitel werden die Anwendung der Methode unter Verwendung der drei entwickelten Softwareprogramme zur Anwendungsunterstützung sowie die Ergebnisse des Fallbeispiels vorgestellt.

6.2.1 Schritte 1 und 2: Analyse des Planungsprozesses und Modellierung der Unschärfen

Die Software *aranea* wurde im Rahmen dieser Arbeit als Werkzeug zur Modellierung und Analyse spezifischer Planungsprozesse sowie zur Unterstützung der Unschärfemodellierung und -fortpflanzung konzipiert. Zunächst wird im Anwendungsfall das Phasenmodell des BMW-spezifischen Fabrikplanungsprozesses mithilfe der SIPOC-Logik (siehe Kap. 5.2) vervollständigt, plausibilisiert und alle relevanten Eingangs- und Ausgangsparameter werden dokumentiert. Der für die Fabrikstrukturplanung des Werkes Mexiko relevante Teilprozess dieses Phasenmodells wird mithilfe von *aranea* detailliert untersucht. Dazu werden die Wirkbeziehungen zwischen den einzelnen Planungsparametern identifiziert und diese anschließend in Module überführt, die in *aranea* auf einer grafischen Benutzeroberfläche durch die Anwender erstellt und angeordnet werden können (Abb. 6.1).

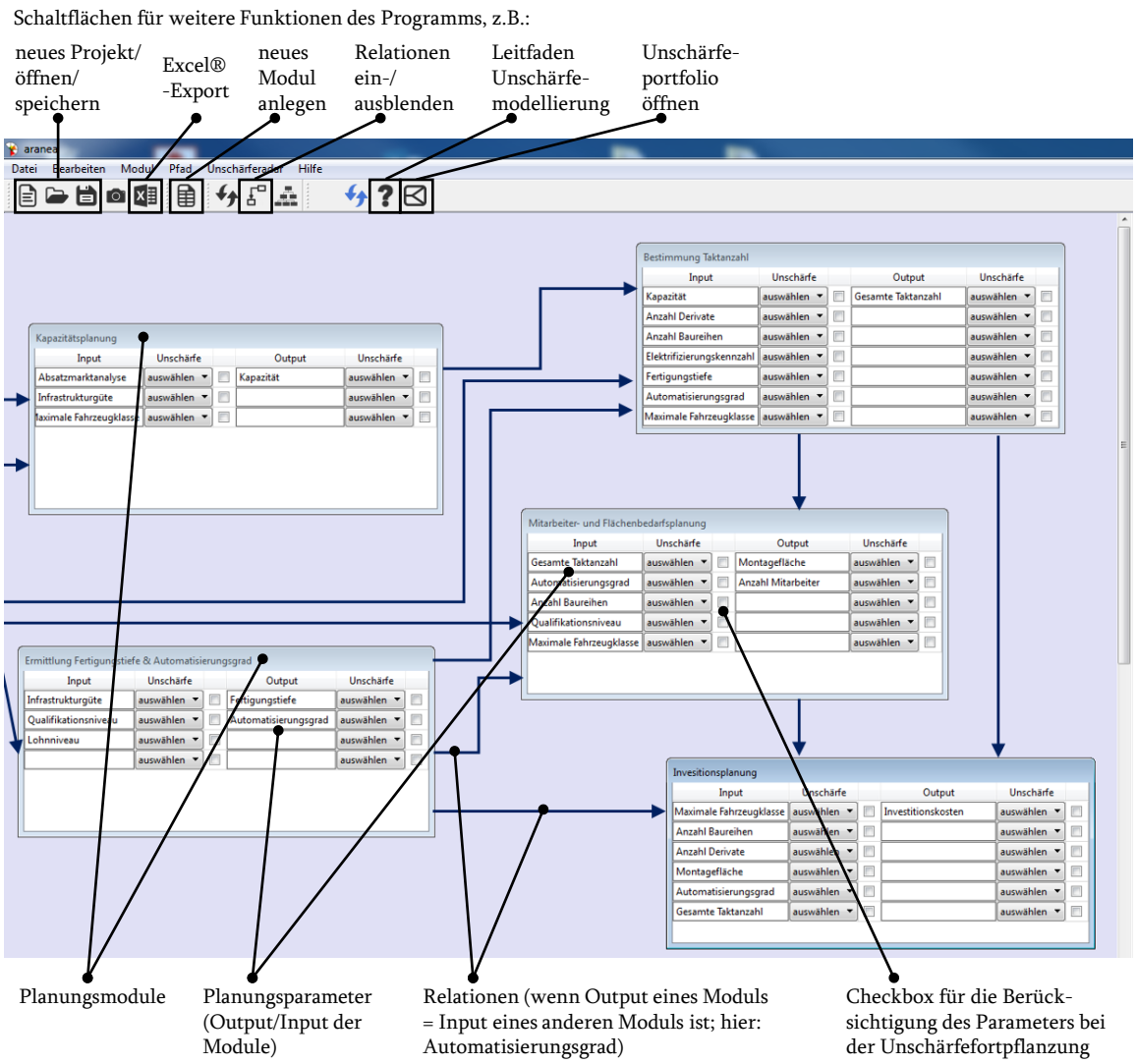


Abb. 6.1: Ausschnitt des in *aranea* modellierten Strukturplanungsprozesses bei BMW.

Die Unschärfen der abhängigen Planungsparameter Taktanzahl und Fertigungsfläche werden mithilfe der Unschärfefortpflanzung bestimmt. Zu diesem Zweck werden zunächst die Grundtypen der Wirkbeziehungen zwischen den Einflussparametern ermittelt sowie deren jeweilige Unschärfe mithilfe des in Kap. 5.3.1 vorgestellten Leitfadens modelliert. Der Leitfaden ist in der Software *aranea* implementiert, sodass der Anwender über ein Dropdown-Menü den jeweiligen Planungsparameter (in Abb. 6.2: Anzahl Derivate) auswählen und für diesen die Fragen aus dem Leitfaden sukzessive beantworten kann. Das Ausgabefenster mit der Modellierungsempfehlung (in Abb. 6.2: subjektive, diskrete Binomialverteilung) sowie dem Wert für die Modellierbarkeit M (hier: 0,5) ist in Abb. 6.2 dargestellt. Die Anwendung des Leitfadens erfolgt unter Einbindung der jeweils zuständigen planungsbeteiligten Experten.

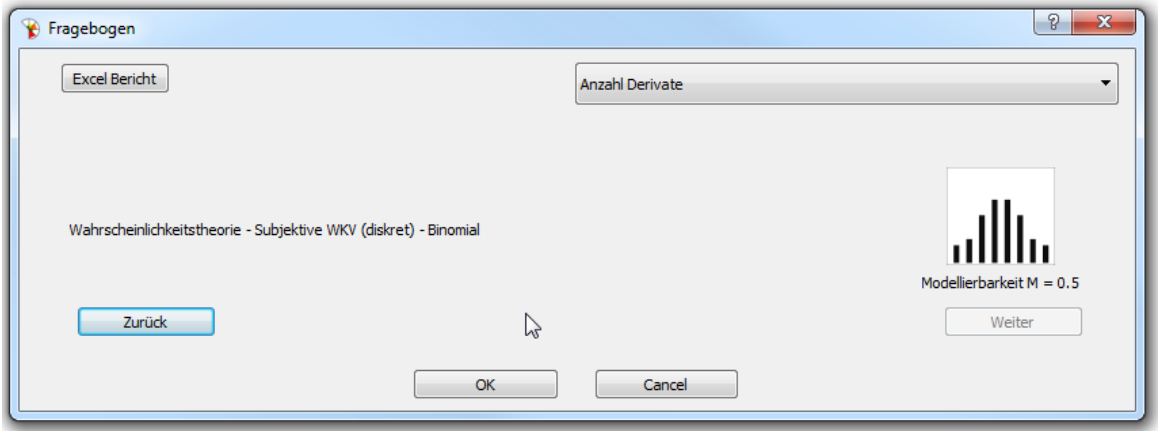


Abb. 6.2: *Aranea* – beispielhafte Ergebnisausgabe der leitfadenbasierten Modellierung einzelner Parameterunschärfen.

Das untersuchte Wirkungsgefüge der Planungsparameter kann dem Grundtyp 2 (siehe Kap. 5.3.2) zugeordnet werden, die Parameterunschärfen werden überwiegend als diskrete und kontinuierliche subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung quantifiziert (Tabelle 6.1).

Tabelle 6.1: Ergebnis der Unschärfemodellierung der Planungsparameter aus dem Anwendungsbeispiel (Auszug).

Parameter	Modellierungsform	Darstellung
Infrastrukturgüte	Dreiecksverteilung	
Qualifikationsniveau	Gleichverteilung	
Lohnniveau	Dreiecksverteilung	
Maximale Fahrzeugklasse	diskr. Einzelwahrscheinlichkeiten	
Ausbringungsmenge	Normalverteilung	
Anzahl Derivate	diskr. Gleichverteilung	
Elektrifizierung – PHEV	diskr. Einzelwahrscheinlichkeiten	
Elektrifizierung – BEV	diskr. Einzelwahrscheinlichkeiten	
Automatisierungsgrad	Dreiecksverteilung	

Legende: PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle
BEV: Battery Electric Vehicle

6.2.2 Schritt 3: Unschärfefortpflanzungsanalyse und Handlungsempfehlung

Für die zwei abhängigen Parameter *Gesamte Taktanzahl* und *Montagefläche* (siehe Abb. 6.1) ist die Unschärfe nicht mithilfe des Leitfadens bestimmbar, da diese von der Unschärfe mehrerer weiterer Einflussparameter abhängig ist. Die Wirkbeziehungen zwischen diesen Einflussparametern und den abhängigen Parametern liegen zunächst nicht als Berechnungsvorschrift vor, es wird jedoch eine Korrelation zwischen den Parametern von den Planungsexperten angenommen. Eine Regressionsanalyse führt zu dem Ergebnis, dass für die meisten durch die Experten angegebenen Wirkbeziehungen eine auf dem 5 %-Niveau signifikante Korrelation vorliegt. Das Wirkungsgefüge kann damit in Form einer Regressionsgleichung (Wirkbeziehungen 2. Art, siehe Kap. 5.3.2) modelliert werden. Die Regressionsanalyse wird mit der Statistiksoftware IBM SPSS Statistics® durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang M detailliert, die Regressionsgleichungen für die Berechnung der abhängigen Parameter *Gesamte Taktanzahl* und *Montagefläche* lauten wie folgt:

$$Anz_{Takte} = 110{,}88 + 12{,}67 \cdot s + 17{,}29 \cdot Anz_{Derivate} + 450{,}64 \cdot FT - 173{,}20 \cdot EK \tag{6.1}$$

$$A_{Montage} = -7.957{,}49 + 91{,}88 \cdot Anz_{Takte} + 417.974{,}22 \cdot AG + 2431{,}25 \cdot FK_{max} \tag{6.2}$$

mit
- Anz_{Takte}: gesamte Anzahl Takte
- $Anz_{Derivate}$: Anzahl Derivate
- s: zu produzierende Stückzahl
- FT: Fertigungstiefe
- EK: Elektrifizierungskennzahl
- $A_{Montage}$: Montagefläche
- AG: Automatisierungsgrad
- FK_{max}: größte produzierte Fahrzeugklasse

Die Modellgüte beider Regressionsgleichungen sind, gemessen am Bestimmtheitsmaß R^2[61], als gut bzw. sehr gut zu bewerten: Für die Ermittlung der Taktanzahl beträgt $R^2 = 0{,}965$ bzw. für die Montagefläche $0{,}747$ (Anhang M).

[61] Das Bestimmtheitsmaß R^2 ist ein Maß zur Bewertung der durch das Regressionsmodell erklärten Varianz im Vergleich zur Gesamtvarianz des Ergebnisses (WINKER 2017, S. 155).

Für die Durchführung der Unschärfefortpflanzungsanalyse werden je nach Mechanismus (Gauß'sches Unschärfefortpflanzungsgesetz, Monte-Carlo-Simulation oder Fuzzy-Inferenz) unterschiedliche, z. T. bereits existierende Softwarewerkzeuge herangezogen. Eine Übersicht ist in Anhang L dargestellt. Da für das vorliegende Wirkungsgefüge vom Grundtyp 2 die Monte-Carlo-Simulation angewendet wird, kommt das in Microsoft Excel® eingebundene und damit in *aranea* verwendbare Oracle Crystal Ball® Add-In zum Einsatz. Dieses ermöglicht die Modellierung der Unschärfen der Eingangsparameter des Wirkungsgefüges mit beliebigen kontinuierlichen und diskreten Verteilungen. Außerdem stellt es eine Funktion zur Simulation des abhängigen Planungsparameters und seiner Verteilung auf Basis der vorliegenden Berechnungsvorschrift (hier die in Formel (6.1) bzw. (6.2) dargestellte Regressionsgleichung) dar. Das Ergebnis[62] der Ermittlung der Parameterunschärfen für die Taktanzahl und die Montagefläche mittels Monte-Carlo-Simulation ist in Abb. 6.3 dargestellt.

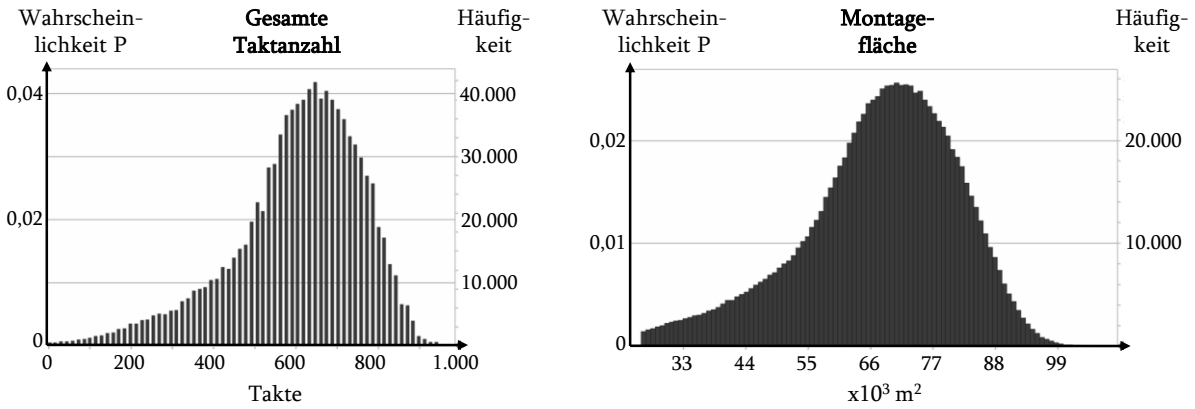


Abb. 6.3: Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Unschärfe der abhängigen Parameter Taktanzahl und Montagefläche.

Zur Ableitung unschärfebezogener Handlungsempfehlungen wurde das in Kap. 5.4.2 vorgestellte Unschärfeportfolio in *aranea* implementiert. Die Aktivsumme[63] und Modellierbarkeit[64] der Unschärfen werden automatisiert berechnet, die relativen Unschärfen über ein Abfragefenster eingelesen.

[62] Ergebnis für 50.000 Simulationsdurchläufe in Oracle Crystal Ball®.
[63] Die Aktivsumme wird auf Basis des in *aranea* modellierten Planungsprozesses und der in diesem enthaltenen Planungsparameter sowie deren individuellen Abhängigkeiten, wie in Kap. 5.2 beschrieben, berechnet.
[64] Die Modellierbarkeit M der Unschärfe eines jeden Planungsparameters wird nach der Beantwortung der Fragen im Leitfaden zur Unschärfemodellierung, wie in Kap. 5.3.1 beschrieben, berechnet.

In dem in Abb. 6.4 dargestellten Unschärfeportfolio ist die Unschärfe des abhängigen Parameters *Gesamte Taktanzahl* und deren Einflussparameter visualisiert. Dabei handelt es sich um die realen Unschärfen des Anwendungsfalls. Die angegebenen Prozentwerte geben die Höhe der jeweiligen relativen Unschärfe in Bezug auf die Gesamtunschärfe des abhängigen Parameters wieder. Die Unschärfe der *Produktionsmenge* trägt beispielsweise mit 32 % zur Unschärfe der *gesamten Taktanzahl* bei. Es ist ersichtlich, dass die Unschärfen der Parameter *Elektrifizierung*, *Standortwahl* und die *Absatzmarktanalyse* eine geringe Modellierbarkeit aufweisen. Während bei den Letztgenannten die Handlungsempfehlung „Unschärfe besser quantifizieren" nicht umsetzbar ist, wurde im Anwendungsfall für die *Elektrifizierung* eine Kennzahl entwickelt, die eine bessere Quantifizierung und damit eine bessere Modellierbarkeit der Unschärfe ermöglicht. Diese Kennzahl basiert auf der Anzahl der in einem Werk produzierten PHEV[65]- und BEV[66]-Derivate. Um die Unschärfe der *Taktanzahl* zu reduzieren, sollten zunächst die Unschärfen der Einflussfaktoren *Produktionsmenge* und *maximale Fahrzeugklasse*[67] reduziert werden.

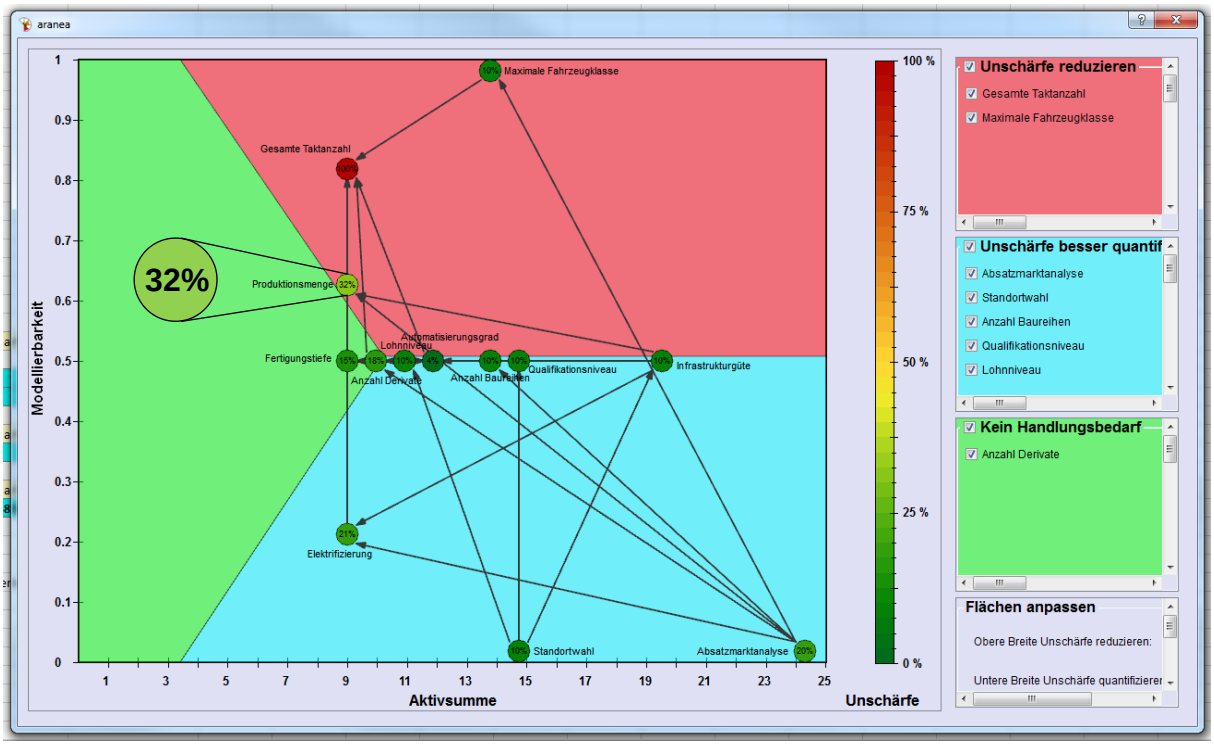


Abb. 6.4: Unschärfeportfolio der Parameterunschärfen im Anwendungsfall, abhängiger Parameter: Taktanzahl.

[65] Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Plug-in-Hybridfahrzeug).
[66] Battery Electric Vehicle (Elektroauto).
[67] Der Parameter *maximale Fahrzeugklasse* gibt die aufwendigste im Werk produzierte Fahrzeugklasse auf einer Ordinalskala von 1 bis 5 an, wobei 1 der Klasse MINI und 5 der Klasse BMW 7er/X7 entspricht.

Im Fall der Produktionsmenge kann dies durch eine verbesserte Methode zur Prognose der zukünftigen Absatzstückzahl, die derzeit bei BMW erarbeitet wird, erreicht werden. Um die Unschärfe der maximalen Fahrzeugklasse zu reduzieren, könnte diese im Voraus festgelegt werden.

Die Grenzen, mit denen die Bereiche der unterschiedlichen Handlungsempfehlungen voneinander getrennt werden, können vom Anwender individuell angepasst werden, je nachdem, wie die einzelnen Unschärfen der Planungsparameter im Portfolio verteilt sind (siehe Kasten *Flächen anpassen* in Abb. 6.4). An dieser Stelle sei nochmals darauf hingewiesen, dass die im Unschärfeportfolio dargestellten Unschärfen sich immer auf einen abhängigen Planungsparameter beziehen. In Abb. 6.4 ist das Wirkungsgefüge für den abhängigen Parameter Gesamte Taktanzahl abgebildet. Die Unschärfe des abhängigen Parameters Montagefläche und deren unscharfe Einflussfaktoren werden mithilfe von *aranea* in einem separaten Fenster dargestellt, um die Übersichtlichkeit der Ergebnisausgabe sicherzustellen.

6.2.3 Schritte 4 und 5: Auswahl, Dimensionierung und Kombination der Veränderungsbefähiger

Nachdem die relevanten Unschärfen identifiziert und modelliert sind, erfolgt die Auswahl und Dimensionierung von Veränderungsbefähigern im Rahmen eines Expertenworkshops. In dem bearbeiteten Fallbeispiel wird dazu der VBF-Referenzkatalog herangezogen. 47 der insgesamt 122 Tertiärbefähiger werden als prinzipiell relevant für das Werk Mexiko eingestuft. Die Idealwerte werden unter Einbezug der modellierten Unschärfen durch die Experten definiert. Da es sich bei dem Anwendungsfall um ein Greenfield handelt, sind noch keine Ist-Wert für die VBF vorhanden. Stattdessen werden Minimalwerte für die Ausprägungen der Tertiärbefähiger durch die Experten definiert, die mit den Idealwerten zu Erfüllungsgraden verrechnet werden. Auf Basis der Erfüllungsgrade werden für alle relevanten VBF Referenzaktionen abgeleitet. Im Anschluss erfolgt die Berechnung der Beeinflussungskennzahl für jeden VBF automatisiert mithilfe des Softwareprogramms *InfCalc* (Influence Calculator, Abb. 6.5).

Da in der industriellen Praxis häufig Microsoft Excel® zum Einsatz kommt, wurde *InfCalc* mithilfe der Programmiersprache VBA als Excel®-Makro entwickelt, das auf jedem Rechner mit Microsoft Office® ausgeführt werden kann.

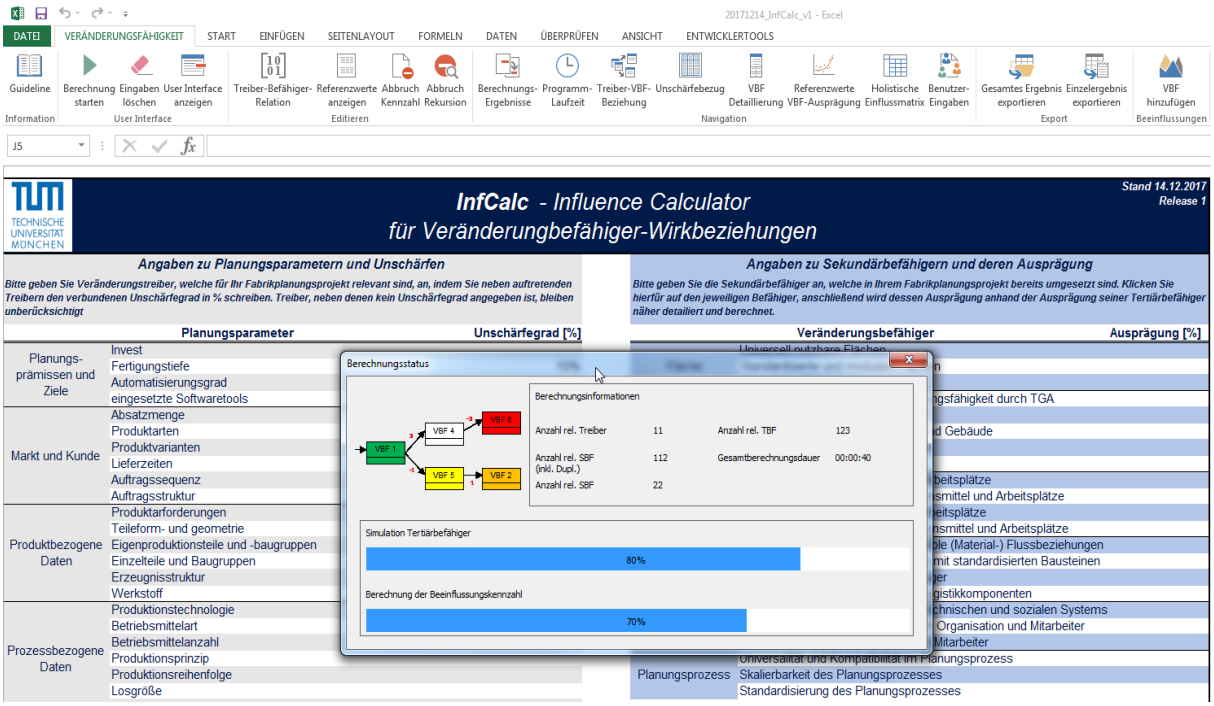


Abb. 6.5: Screenshot InfCalc: Automatisierte Berechnung der Beeinflussungskennzahlen.

Der automatisierten Berechnung der Beeinflussungskennzahlen in *InfCalc* liegt der in Kap. 5.6.1 entwickelte Algorithmus (Formel (5.16)) zugrunde. Mithilfe von *InfCalc* wird eine Rangliste der Tertiärbefähiger nach absteigender Beeinflussungskennzahl (Tabelle 6.2) aufwandsarm generiert. Der VBF mit der höchsten BK harmoniert, basierend auf den positiven und negativen Wirkbeziehungen sowie den geforderten Referenzaktionen (Erhöhung oder Verringerung der VBF-Ausprägung), am besten mit den anderen VBF im Wirkungsgefüge und ist daher bei der Auswahl zu priorisieren. Damit bildet die Rangliste die Grundlage für die im Folgenden erläuterte VBF-Kombination.

Die Kombination und Auslegung der VBF erfolgt im Rahmen eines Expertenworkshops unter Einbezug der zuständigen Planungsbeteiligten. Der in Kap. 5.6.2 vorgestellte Leitfaden wird im Anwendungsfall verwendet, um das Vorgehen zur Kombination der VBF im Workshop zu strukturieren. Für die Visualisierung der sukzessive aufgebauten Kombinationen und ihrer Wirkbeziehungen während des Workshops wurde die Software *cmt* (Complexity Management Tool) entwickelt, die komplexe Wirkungsgefüge (siehe Anhang N) aus einer DSM automatisiert darstellt und eine Funktion zur Erstellung eines Einflussportfolios beinhaltet. Diese Funktion kann auch zur Analyse des Wirkungsgefüges der Planungsparameter angewendet werden. Für weitere Details zu *cmt* sei auf HAWER ET AL. (2016A) verwiesen.

Tabelle 6.2: Auszug der Berechnungsergebnisse für die Beeinflussungskennzahlen der Tertiärbefähiger.

Nr.	Tertiärbefähiger	BK
1	keine Gruben, keine Wannen im Boden	186
2	ebener Boden, wenige Ecken	168
3	Luftheizung anstelle einer Bodenheizung	139
4	niedriger Automatisierungsgrad der Transporttechnik	137
5	kostengünstig versetzbare, standardisierte Systemwände innen	136
6	feste Einbauten in Randlage des Gebäudes	128
7	Betonanker anstatt Maschinenfundament	123
8	einfache Technik zum Verbinden der Träger ohne Spezialwerkzeug	118
9	Verkehrserschließung der Gebäude von mehreren Seiten gewährleisten	115
10	Skelettbauweise der Wandbauweise vorziehen	112
11	Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk	112
12	überdimensionierte Tragwerksbelastbarkeit	112
13	einfache Maschinen für spezifische, hoch arbeitsteilige Arbeitsgänge	105
14	Sprinkler statt Brandwände zur Reduktion der Innenwände	104
15	Medienleitungen in Wannen oder offenen Trassen, nicht unter Putz	94
16	freie Bauflächen außerhalb des Fabrikgebäudes	92
17	ausreichend dimensionierte Gebäudehöhe	88
18	[illegible]ionierte Wege	86

Das Ergebnis des Expertenworkshops sind drei alternative VBF-Kombinationen, die in Form einer Liste dargestellt werden können (Tabelle 6.3) und die in jeweils unterschiedliche Grundlayouts eingeplant sind (Abb. 6.6). Aus Gründen der Geheimhaltung werden nur die Groblayouts und die in diesen umgesetzten VBF ohne quantitative Angabe der VBF-Ausprägungen dargestellt.

Die Fabrikstrukturvariante 1 zeichnet sich durch eine sog. Fingerstruktur aus, wobei in jedem Finger eine Produktionslinie verläuft. Als Vorbild für dieses Groblayout dient das BMW-Werk Leipzig (siehe CLAUSSEN 2012, S. 207-235). Die Stirnseiten der Gebäudefinger weisen Freiflächen auf. Bei Bedarf können diese durch eine Erweiterung des Gebäudes vergrößert und damit zusätzliche Takte in die Linien integriert werden. Eine vollständige Spiegelung ist aufgrund der größeren benötigten Grundfläche dieses Layouts in Mexiko jedoch nicht möglich. Durch die Platzierung der Vormontagen zwischen den Gebäudefingern liegen diese direkt am Verbauort, womit eine Reduzierung von Transportstrecken erreicht wird. Durch die an den Seiten der Finger vorgesehenen Logistikflächen kann eine Belieferung zwischen den Gebäudefingern direkt an die Linien erfolgen. Trainingscenter, Produktionsbüros und Pausenräume sowie Sanitärbereiche liegen in der Mitte der Hauptachse,

wodurch eine gute Kommunikation zwischen direkten und indirekten Bereichen bzw. Planenden und Betreibern gewährleistet wird.

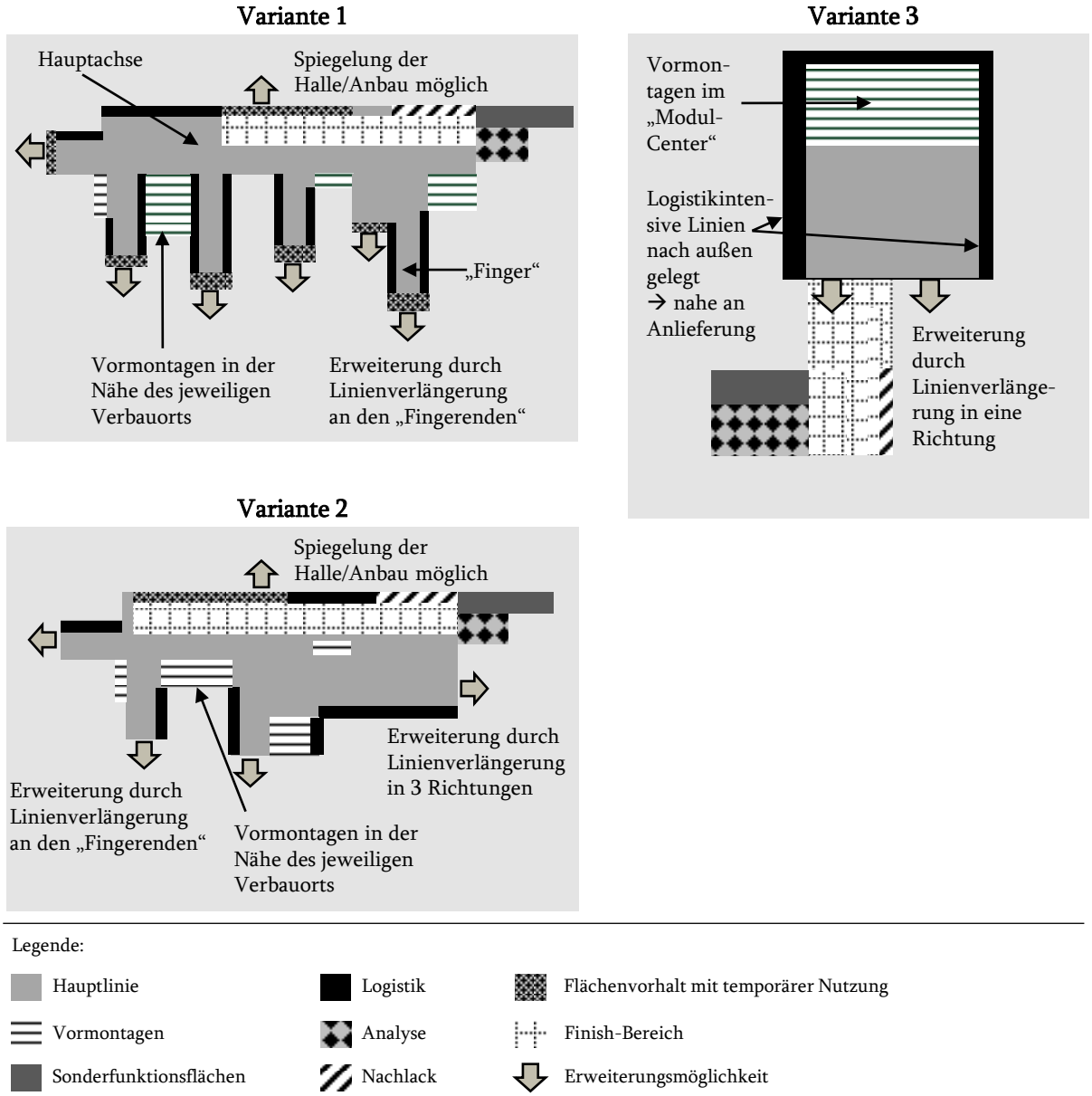


Abb. 6.6: Ergebnis der VBF-Kombination: 3 alternative Fabrikstrukturvarianten.

Die räumliche Abgrenzung innerhalb des Fabrikgebäudes erfolgt durch aufwandsarm versetzbare Systemwände. Die Betriebsmittel sind für zukünftige Anforderungen robust dimensioniert. Die Transporttechnik ist nur zum Teil automatisiert (v. a. in der Vormontage), wodurch eine einfache Änderung der Transportrouten und -mengen gefördert wird. Ortsfixe Anlagen (z. B. die sog. Hochzeit) sind zwischen den Fingern in der Hauptachse des Gebäudes positioniert, sodass die Erweiterung der Produktion in Richtung der Gebäudefin-

ger aufwandsarm erfolgen kann. Die Tragwerksbelastbarkeit des Gebäudes ist überdimensioniert, damit bei einer zukünftigen Erweiterung der Produktionskapazität zusätzliche Medien durch über das Dachtragwerk verlegte Leitungen bereitgestellt werden können. Der Unschärfe-Kompensationsgrad der Variante 1 beträgt 87 %.

Die Fabrikstrukturvariante 2 ähnelt der Variante 1, weist jedoch bei unterschiedlichen VBF eine geringere Ausprägung und eine weniger komplexe Gebäudeform auf, sodass niedrigere Investitionskosten erzielt werden. So werden vor allem die VBF zur Steigerung der Flexibilität, die eine temporäre Überdimensionierung der Fabrikstrukturen verursachen, nicht oder mit einer geringeren Ausprägung umgesetzt. Dazu gehört die Überdimensionierung der Tragwerksbelastbarkeit, der Gebäudehöhe, der Medienleitungen sowie der Transport- und Betriebsmittel (siehe Tabelle 6.3). VBF zur Förderung der Wandlungsfähigkeit werden weiterhin eingeplant. Das Gebäude kann, wie in Abb. 6.6 dargestellt, in 3 Richtungen erweitert werden, eine vollständige Spiegelung der Fabrik ist jedoch, wie bei Variante 1, nicht möglich. Die Hauptcharakteristika bzgl. Platzierung von Vormontagen, Logistik- und Anlieferungsbereichen sowie der indirekten Funktionen in der Mitte der Hauptachse des Gebäudes sind an Variante 1 angelehnt und werden an dieser Stelle nicht erneut erläutert. Der Unschärfe-Kompensationsgrad der Variante 2 beträgt 64 %.

Die Fabrikstrukturvariante 3 basiert auf einer rechteckigen Gebäudeform, deren Südseite Möglichkeiten für potenzielle Erweiterungen bietet. Im Außenbereich der Fabrik ist genügend Freifläche für eine vollständige Spiegelung des Gebäudes vorhanden. Die Logistikflächen sind an den Rändern der Halle lokalisiert, was den freien Zugang für den Lieferverkehr in diesen Bereichen gewährleistet. Die Vormontagen sind in einem sog. Modulcenter im nördlichen Hallenteil platziert und können bei Bedarf aufwandsarm ausgelagert und an Fremdfirmen vergeben werden. Innerhalb der Halle begünstigt ein großes Säulenrastermaß die Mobilität der Betriebs- und Transportmittel. Das Layout zeichnet sich durch eine kompakte Anordnung mit wenigen Ecken aus. Die Betriebsmittel sind für zukünftige Anforderungen robust dimensioniert. Die Transport- und Fördertechnik ist zu einem großen Teil automatisiert. Der Unschärfe-Kompensationsgrad der Variante 3 beträgt 76 %.

Tabelle 6.3: Ergebnis der VBF-Kombination: Liste der VBF und deren Umsetzungsgrade.

Nr.	Tertiärbefähiger	BK	Variante 1	Variante 2	Variante 3
1	keine Gruben, Wannen im Boden	186	z.T.	z.T.	z.T.
2	ebener Boden, wenige Ecken	168	ja	ja	ja
3	Luftheizung anstelle Bodenheizung	139	ja	ja	ja
4	niedriger Automatisierungsgrad der Transporttechnik	137	ja	z.T.	z.T.
5	kostengünstig versetzbare, standardisierte Systemwände innen	136	ja	nein	z.T.
6	feste Einbauten (z. B. Treppen, Energiezentralen) abseits der Erweiterungsrichtungen	128	ja	ja	z.T.
7	feste Einbauten (z. B. Treppen, Energiezentralen) in Randlage des Gebäudes	128	ja	ja	z.T.
8	Betonanker anstatt Maschinenfundament	123	ja	ja	ja
9	einfache Technik zum Verbinden der Träger ohne Spezialwerkzeug	118	ja	ja	ja
10	Verkehrserschließung der Gebäude von mehreren Seiten	115	z.T.	z.T.	ja
11	Skelettbauweise der Wandbauweise vorziehen	112	ja	ja	z.T.
12	Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk	112	ja	ja	ja
13	überdimensionierte Tragwerksbelastbarkeit	112	ja	nein	nein
14	Sprinkler statt Brandwände zur Reduktion der Innenwände	104	ja	ja	ja
15	Medienleitungen in Wannen oder offenen Trassen, nicht unter Putz	94	ja	ja	ja
16	freie Bauflächen außerhalb des Fabrikgebäudes	92	ja	z.T.	ja
17	überdimensionierte Gebäudehöhe	88	ja	nein	z.T.
18	überdimensionierte Wege	86	z.T.	z.T.	z.T.
19	Bereiche haben nur eine fixe Kante, erweiterbar in andere Richtungen	70	ja	ja	z.T.
20	kostengünstig versetzbare / rückbaubare Außenwände	68	ja	ja	ja
21	gesamte Fläche von allen Transportmitteln befahrbar	62	ja	ja	ja
22	Logistik- zu Montagefläche wandelbar und umgekehrt	60	ja	ja	ja
23	Frei- bzw. Reserveflächen ("Flächenpuffer") innerhalb der Fabrikhalle	39	ja	z.T.	z.T.
24	Standardisierung der Transportmittel und Behältersysteme	28	ja	ja	ja
25	keine standortfixen Strukturen am Bandende	12	ja	ja	z.T.
26	Kompakte räumliche Anordnung gleichartiger Funktionseinheiten	0	z.T.	z.T.	ja
27	überdimensionierte Medienleitungen	-7	z.T.	nein	z.T.
28	robuste Dimensionierung der Transport-, Hilfsmittel, Behältersysteme	-9	ja	nein	ja
29	eingeschossige Gebäude	-12	z.T.	z.T.	ja
30	überdimensionierte Betriebsmittel	-35	ja	nein	ja
31	Wachstumsflächen in verschiedene Richtungen innen und außen (für Produktionserweiterung)	-41	ja	z.T.	z.T.
32	Überkapazitäten durch Ausweichmaschinen	-54	ja	nein	ja
33	Positionieren von schweren, standortfixen Maschinen in Randlage	-62	ja	z.T.	z.T.
34	Integration der Belüftungsanlagen in Dach-/Deckentragwerk	-63	ja	ja	ja

Legende: BK: Beeinflussungskennzahl
z.T.: zum Teil

Neben den vorgestellten Unterschieden der Fabrikstrukturvarianten weisen diese jedoch auch eine Reihe an VBF auf, die in allen Varianten gleichermaßen eingeplant sind (siehe Tabelle 6.3): Das eingeschossige Fabrikgebäude aller Varianten ist in Skelettbauweise erstellt, die Tragwerksverbindungen sind geschraubt. Somit ist ein Versatz der Gebäudewände kostengünstig realisierbar. Die Medienversorgung erfolgt in Wannen oder offenen Trassen (nicht unter Putz) über das Deckentragwerk des Gebäudes. Damit sind eine flächendeckende Versorgung der Linien sowie die Änderung und Erweiterung der Medienversorgung möglich. Auch die Belüftungs- und Klimatisierungsanlagen sind in das Deckentragwerk integriert. Die Betriebsmittel und Anlagen, die nicht zwingend eine Grube, Wanne oder Fundament im Boden benötigen, sind aufgrund ihrer Fixierung durch Betonanker mobil. Die gesamte Hallenfläche ist für den Verkehr von Transportmitteln geeignet. Dies fördert eine Umwandlung der Montage- in Logistikfläche und umgekehrt, womit eine Umnutzung von Fabrikbereichen ermöglicht wird. Wie aus Tabelle 6.3 ersichtlich ist, werden nicht alle der 47 für diesen Planungsfall als relevant identifizierten VBF auch in den Fabrikstrukturvarianten umgesetzt. Dies liegt daran, dass einige VBF eine negative Beeinflussungskennzahl aufweisen und deren Aufnahme in die jeweilige VBF-Kombination zu mehreren negativen Wirkbeziehungen innerhalb der Kombination geführt hätte. Die Realisierung von VBF-Kombinationen mit vielen negativen Wirkbeziehungen führt in der Praxis zu erhöhten Investitionskosten. Deshalb wurden die Abbruchkriterien für das Vorgehen der VBF-Kombination (siehe Kap. 5.6.2) so gewählt, dass nur eine geringe Anzahl negativer Wirkbeziehungen innerhalb der VBF-Kombinationen erlaubt ist.

6.2.4 Schritt 6: Bewertung der Fabrikstrukturvarianten

Nachdem im vorherigen Schritt der Methode alternative Fabrikstrukturvarianten durch Kombination der VBF gebildet wurden, werden diese Varianten anschließend bewertet. Dazu wird das in Kap. 5.7 vorgestellte Verfahren im Anwendungsfall durchgeführt. Die Ergebnisse der **Veränderungspotenzialanalyse** liegen in Form der Kompensationsgrade der Fabrikstrukturvarianten bereits vor. Für die Wirtschaftlichkeitsanalyse werden zunächst die in Tabelle 5.4 aufgeführten benötigten Daten erhoben. Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsbewertung[68] sind in Tabelle 6.4 dargestellt.

[68] Die Zahlenwerte wurden aus Geheimhaltungsgründen geändert.

Die größte Unschärfekompensation (87 %) und damit auch die größte Veränderungsfähigkeit weist Variante 1 auf. D. h. durch die in Variante 1 umgesetzte VBF-Kombination werden 87 % der vorhandenen Unschärfen kompensiert.

Bei der Berechnung des Kapitalwertes im Rahmen der **Wirtschaftlichkeitsanalyse** werden lediglich die Kosten einbezogen, die bei den Varianten unterschiedlich hoch sind (siehe Kap. 5.7). Erträge werden nicht berücksichtigt, da alle drei Varianten die gleiche Ausbringung und damit den gleichen Umsatz erzeugen. Aus diesem Grund sind die drei berechneten Kapitalwerte negativ. In die Berechnung des Kapitalwertes wurden Investitionskosten, jährliche Betriebskosten und zukünftige Umbaukosten einbezogen, die mit einem Kalkulationszinssatz von 8 % abgezinst wurden. Die meisten der in der Kapitalwertberechnung berücksichtigten monetären Einflussgrößen unterliegen einer Unschärfe, die, wie in KREBS (2012, S. 120–122) beschrieben, durch Anwendung der Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation sind unscharfe Kapitalwerte für die drei Fabrikstrukturvarianten, die in Abb. 6.7 dargestellt sind.

Der erwartete Kapitalwert der Variante 1 ist mit einem Erwartungswert von -5,6 Mio. Euro zwar am höchsten, dessen Standardabweichung aufgrund der vorhandenen Unschärfen jedoch auch am größten. Die Sensitivitätsanalyse (siehe KREBS 2012, S. 127–129) zeigt, dass dies vor allem durch Unschärfen der Betriebskosten , wie z. B. der aufgrund des geringen Automatisierungsgrades der Transporttechnik größeren Personalkosten in der Logistik, hervorgerufen wird.

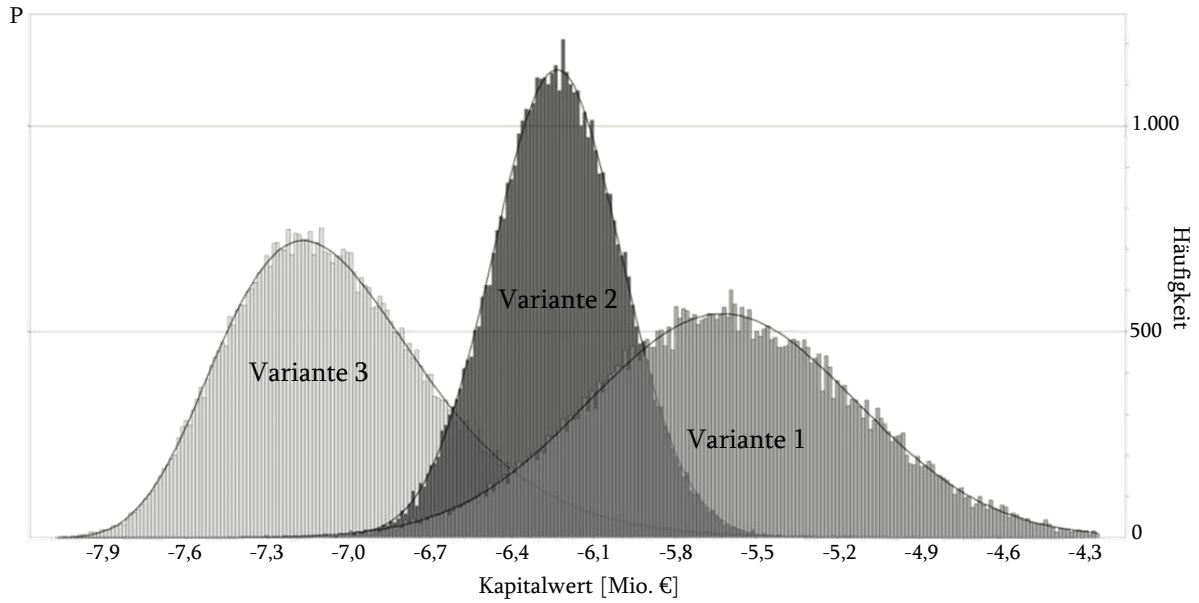


Abb. 6.7: Ergebnis der Monte-Carlo-Simulation zur Bestimmung der Kapitalwerte und deren Verteilung.

Anders ist das Ergebnis für Variante 2, deren Kapitalwert mit einem Erwartungswert von -6,2 Mio. Euro niedriger ist, dessen geringe Standardabweichung jedoch auch zu einer schmaleren Verteilung und damit zu einem schärferen Kapitalwert führt. Das Risiko der Abweichung vom Erwartungswert ist daher bei Variante 2 geringer als bei Variante 1 oder 3. Dies liegt daran, dass die Unschärfe des Kapitalwertes von Variante 2 ebenfalls durch die Unschärfe der Betriebskosten verursacht wird, deren Absolutwert jedoch geringer ist als bei Variante 1. Der erwartete Kapitalwert von Variante 3 ist mit -7,2 Mio. Euro aufgrund der hohen zukünftigen Umbaukosten am niedrigsten, obwohl die Betriebskosten wegen eines hohen Automatisierungsgrades relativ zu den Varianten 1 und 2 niedrig sind. Die große Varianz des Kapitalwertes entsteht zu 2/3 durch die Unschärfe der zukünftigen Umbaukosten. Diese Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse sind ebenfalls Teil der Ergebnisdarstellung in Tabelle 6.4. Die Zuordnung einer Veränderungsstrategie zu den Fabrikstrukturvarianten erfolgt mithilfe des Veränderungsfähigkeits-Würfels. Zu diesem Zweck werden die Investitions-, Betriebs- und Umbaukosten der Fabrikstrukturvarianten miteinander verglichen und eine Einordnung in die Oktanten des Würfels, wie in Abb. 6.8 dargestellt, vorgenommen.

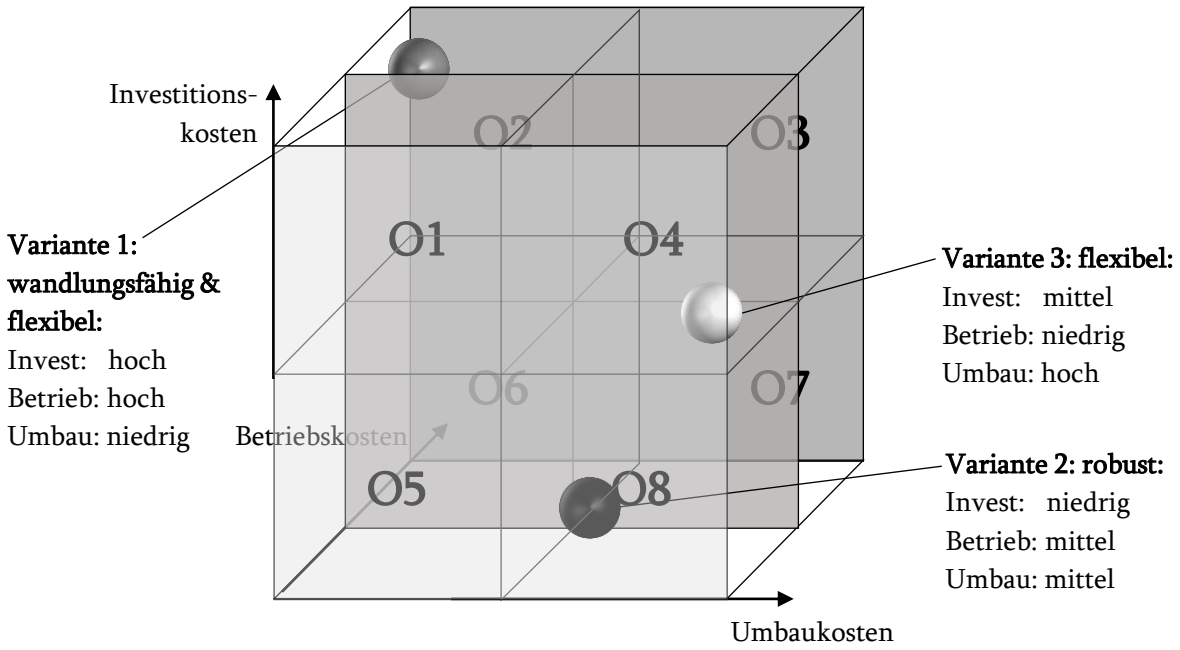


Abb. 6.8: Einordnung der Fabrikstrukturvarianten in den Veränderungsfähigkeits-Würfel.

Die Fabrikstrukturvariante 1 beinhaltet eine Vielzahl an VBF, deren im Durchschnitt hohe Ausprägungen zu einem hohen Kompensationsgrad, aber ebenfalls zu hohen Investitionskosten führen. Da auch VBF zur Förderung von Flexibilität durch Überdimensionierung

eingeplant wurden, sind die Betriebskosten relativ hoch. Durch das Vorhalten einer Grundflexibilität und die Möglichkeit, die Aktionskorridore aufgrund der vorhandenen Wandlungsfähigkeit zu verschieben, können sehr niedrige Umbaukosten erzielt werden.

Die Fabrikstrukturvariante 2 ist der robusten Veränderungsstrategie zuzuordnen, da aufgrund der geringeren Anzahl an VBF und der gezielten Vermeidung von Überdimensionierung niedrige Investitions- und mittlere Betriebskosten erreicht werden. Um die bei einer robusten Fabrikstruktur hohen Umbaukosten zu reduzieren, wurden einzelne VBF zur Förderung der Wandlungsfähigkeit eingeplant, sodass von einer robusten Variante mit wandlungsfähigen Elementen gesprochen werden kann. Variante 3 ist innerhalb der geplanten Aktionskorridore flexibel und im Betrieb aufgrund eines hohen Automatisierungsgrades kosteneffizient. Wird jedoch ein Umbau erforderlich, zieht dieser hohe Kosten nach sich.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der Bewertung der Fabrikstrukturvarianten im Anwendungsfall.

Bewertungsergebnisse*		**Variante 1**	**Variante 2**	**Variante 3**
Veränderungs-potentialanalyse	Kompensationsgrad	87%	64%	76%
Wirtschaftlich-keitsanalyse	Erwarteter Kapitalwert & Standardabweichung	-5,6 Mio. € 500.000 €	-6,2 Mio. € 200.000 €	-7,2 Mio. € 400.000 €
	Erkenntnisse aus der Sensitivitätsanalyse	Unscharfe Betriebs-kosten	Unscharfe Betriebs-kosten	Unscharfe Umbaukosten
	Einordnung in den Veränderungs-fähigkeits-Würfel	flexibel & wandlungs-fähig	robust, z.T. wandlungs-fähig	flexibel
Nutzwertanalyse	Nutzwert	35	34	37

* Prozentangaben und Nutzwerte sind auf die ganze Zahl gerundet, Angaben in Euro auf volle 100.000.

Die letzte Zeile in Tabelle 6.4 zeigt den Punktwert als Ergebnis der Nutzwertanalyse zur Bewertung qualitativer Kriterien der unterschiedlichen Strukturvarianten. Dabei wurden folgende Kriterien berücksichtigt: Kompaktheit des Layouts („Footprint“ der Gesamtfläche), Raumnutzungsgrad, Erfüllung von Anforderungen der Logistik, effiziente Transportwege (keine kreuzenden Materialflüsse) und kommunikationsfördernde Flächenanordnung.

Die Ergebnisse der Bewertungsmethode dienen als Grundlage für eine Managemententscheidung zur Auswahl einer Fabrikstrukturalternative für das Werk Mexiko, die umgesetzt werden soll. Aus Geheimhaltungsgründen wird das Ergebnis der Entscheidung im Anwendungsfall nicht publiziert.

6.3 Kosten-Nutzen-Analyse der entwickelten Methode

Zur Bewertung des Verhältnisses zwischen Kosten und Nutzen der entwickelten Methode wurden die Arbeitsstunden und sonstigen Kosten (z. B. Softwarelizenzen) zur Durchführung der Methode im Anwendungsfall dokumentiert. Dabei wurden ausschließlich Kosten berücksichtigt, die einen Mehraufwand im Vergleich zum konventionellen Planungsvorgehen darstellen. Der Aufwand für die Entwicklung der im Rahmen dieser Dissertation vorgestellten Methode und der in Kap. 6.2 vorgestellten Softwarewerkzeuge wird bei der Kosten-Nutzen-Analyse nicht berücksichtigt.

In Tabelle 8.5 ist der monetäre Mehraufwand der entwickelten Methode im Vergleich zum konventionellen Planungsvorgehen im Anwendungsfall aufgeführt. Bei der Anwendung der Methode in der industriellen Praxis wurden zur Unterstützung der festangestellten Mitarbeiter und zur Reduzierung der Personalkosten geeignete Tätigkeiten von Praktikanten und Studierenden ausgeführt. Die für die Berechnung der Personalkosten zugrunde liegenden Stundensätze[69] sind in der entsprechenden Spalte in Tabelle 6.5 aufgeführt. Die Anzahl der an den jeweiligen Tätigkeiten beteiligten Mitarbeiter kann der Spalte *Personen* entnommen werden. Die Kosten in der letzten Spalte errechnen sich wie folgt:

$$Kosten = Stunden \cdot Personen \cdot Stundensatz \tag{6.3}$$

Der erste Teil von Tabelle 6.5 enthält die Tätigkeiten zur Durchführung der Schritte 1 und 2 der Methode, die als Initialaufwand angesehen werden können (siehe Kap. 5.1). Die höchsten Kosten entstehen dabei durch die Modellierung des BMW-spezifischen Planungs-

[69] Der Stundensatz für Mitarbeiter wird mit 120 Euro konservativ angesetzt, wobei ein Ingenieurgehalt zugrunde gelegt wird (BAYERISCHE INGENIEURKAMMER-BAU 2015). Auf Basis der tatsächlichen Zahlungen an Studierende und Praktikanten, die an der Anwendung der Methode beteiligt waren, werden für diese Personengruppe 30 Euro als Stundensatz angenommen.

prozesses mithilfe der SIPOC-Logik, die Unschärfemodellierung und Aufnahme von Wirkbeziehungen zwischen den Planungsparametern sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen bzgl. der identifizierten Unschärfen mittels *aranea*.

Die Kosten für die Softwarelizenz für Oracle Crystal Ball® zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulation können ebenfalls dem Initialaufwand zugeschrieben werden. Der gesamte monetäre Initialaufwand zur Durchführung der entwickelten Methode beläuft sich im Anwendungsfall auf ca. 15.000 Euro.

Tabelle 6.5: Monetärer Mehraufwand durch die Anwendung der entwickelten Methode.

	Tätigkeit	Stunden	Personen	Kostengruppe	Stundensatz	Kosten
Initialaufwand Methode Schritte 1 bis 2	Einarbeitung in die Gesamtmethode	22	1	Studierender/Praktikant	30 €	660 €
		8	2	Mitarbeiter	120 €	1.920 €
	Analyse & SIPOC-Modellierung BMW-Phasenmodell (Dokumentation spezifischer Planungsprozess & -parameter)	75	1	Studierender/Praktikant	120 €	9.000 €
		8	2	Mitarbeiter	30 €	480 €
	Unschärfemodellierung mithilfe des Leitfadens & Aufnahme von Wirkbeziehungen zwischen den Planungsparametern	12	1	Studierender/Praktikant	120 €	1.440 €
		3	5	Mitarbeiter	30 €	450 €
	Zwischensumme	**128**				**13.950 €**
Aufwand Durchführung Methode Schritte 3 bis 6	Datenaufnahme für die Unschärfefortpflanzungsanalyse	18	1	Studierender/Praktikant	30 €	540 €
	Entwicklung und Test des Regressionsmodells	13,5	1	Studierender/Praktikant	30 €	405 €
	Durchführung der Regressions- und Unschärfefortpflanzungsanalyse	3	1	Studierender/Praktikant	30 €	90 €
		2,5	1	Mitarbeiter	120 €	300 €
	Auswertung und Analyse in *aranea*	4	1	Studierender/Praktikant	30 €	120 €
	Ableitung von Handlungsempfehlungen bzgl. der Unschärfen	3	1	Studierender/Praktikant	120 €	360 €
		2,5	4	Mitarbeiter	30 €	300 €
	Identifikation relevanter VBF aus dem Referenzkatalog	4	1	Studierender/Praktikant	30 €	120 €
		2	4	Mitarbeiter	120 €	960 €
	Dimensionierung der VBF auf Basis vorhandener Unschärfen	4,5	1	Studierender/Praktikant	30 €	135 €
		4	4	Mitarbeiter	120 €	1.920 €
	Weiterverarbeitung der Workshopergebnisse: Berechnung EG und BK, Anpassung DSM, etc.	5	1	Studierender/Praktikant	30 €	150 €
		1	1	Mitarbeiter	120 €	120 €
	Überprüfung der Gültigkeit der Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern für den Anwendungsfall	5	1	Studierender/Praktikant	30 €	150 €
		4	3	Mitarbeiter	120 €	1.440 €
	Best-Practice Analyse zu Fabrikgroblayouts	11	1	Studierender/Praktikant	30 €	330 €
	Workshop zur VBF-Kombination und Erstellung alternativer Fabrikstrukturvarianten	9	1	Studierender/Praktikant	30 €	270 €
		7,5	3	Mitarbeiter	120 €	2.700 €
	Ausdetaillierung der alternativen Fabrikstrukturvarianten und Integration der jeweils eingeplanten VBF	12	1	Studierender/Praktikant	30 €	360 € *
		16	4	Mitarbeiter	120 €	7.680 € *
	Datenerhebung für die Wirtschaftlichkeitsbewertung	15,5	1	Studierender/Praktikant	30 €	465 €
	Bewertung der alternativen Fabrikstrukturvarianten	3	1	Studierender/Praktikant	30 €	90 €
		2,5	3	Mitarbeiter	120 €	900 €
	Visuelle Aufbereitung der Bewertungsergebnisse	3,5	1	Studierender/Praktikant	30 €	105 €
	Kosten Softwarelizenz Oracle Crystal Ball®					864 €
	Zwischensumme	**156**				**12.834 €**
	Gesamtkosten der Methodenanwendung					**26.784 €**

* Tätigkeit, die innerhalb des herkömmlichen Vorgehens der Fabrikplanung denselben Aufwand verursacht und daher nicht zum Mehraufwand durch die Anwendung der entwickelten Methodik hinzugerechnet wird.

Der zweite Teil von Tabelle 6.5 enthält die Tätigkeiten zur Durchführung der Schritte 3 bis 6 der Methode, die mit jedem Planungsfall iterativ zu wiederholen sind. Die wesentlichen Kosten werden durch die längeren Planungsworkshops von der Dauer eines halben (Di-

mensionierung der VBF auf Basis der vorhandenen Unschärfen, Überprüfung der Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern für den spezifischen Planungsfall) bzw. eines ganzen Arbeitstages (VBF-Kombination) unter Einbezug mehrerer planungsbeteiligter Ingenieure verursacht. Die Feinplanung der alternativen Fabrikstrukturvarianten erfolgt hingegen auch im konventionellen Planungsvorgehen und stellt daher keinen zu berücksichtigenden Mehraufwand dar (in Tabelle 6.5 mit * gekennzeichnet). Der gesamte monetäre Aufwand zur Durchführung der Schritte 3 bis 6 der entwickelten Methode beläuft sich im Anwendungsfall auf ca. 12.800 Euro. Damit beträgt der gesamte durch die Anwendung der Methode verursachte Mehraufwand ca. 26.800 Euro, wobei der Initialaufwand etwa die Hälfte dieser Kosten umfasst.

Eine exakte Berechnung des monetären Nutzens der Methode im Anwendungsfall ist nicht möglich.[70] Daher wird im Folgenden eine Abschätzung vorgenommen, inwiefern die Methode einen möglichen monetären Nutzen erzeugt, der den monetären Aufwand übersteigt. Der wesentliche Mehrwert gegenüber dem konventionellen Planungsvorgehen ist im Folgenden kurz zusammengefasst:

- systematische und präzise Modellierung der vorhandenen Unschärfen der Planungsparameter,
- gezielte Auswahl und Auslegung von VBF zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen, Vermeidung von Fehlplanung und unnötiger Überdimensionierung,
- Sensibilisierung der Planungsbeteiligten für (z. T. stark kostenwirksame) Wirkbeziehungen zwischen den VBF, Vermeidung negativer Wirkbeziehungen, Nutzung von Synergieeffekten bei der VBF-Kombination,
- Bewertung der Fabrikstrukturvarianten unter Berücksichtigung des Unschärfe-Kompensationspotenzials (Kompensationsgrad) sowie unscharfer Einflussgrößen des Kapitalwertes,
- Zuordnung der Varianten zu Veränderungsstrategien als Entscheidungsgrundlage.

Damit bei einer Gesamtinvestitionssumme von ca. 830 Mio. Euro[71] für das BMW-Werk Mexiko ein positives Aufwand-Nutzen-Verhältnis entsteht, muss durch die entwickelte

[70] Zu diesem Zweck hätte dieselbe Fabrik zusätzlich mithilfe des konventionellen Ansatzes geplant werden müssen, um einen direkten Vergleich zwischen der entwickelten und der konventionellen Planungsmethode zu ermöglichen. Eine solche „parallele“ Planung war jedoch aufgrund begrenzter Planungskapazitäten in der industriellen Praxis nicht möglich.

[71] Es wurde der Wechselkurs 1 Euro = 1,20 US-Dollar zugrunde gelegt.

Methode eine Reduzierung dieser Investitionskosten um mindestens 0,004 %[72] möglich sein. Diese Forderung kann als realistisch angesehen werden. Wird durch die Anwendung der Methode eine richtige Entscheidung zugunsten einer Fabrikstrukturvariante auf Basis der Kapitalwertberechnung unter Einbezug der vorhandenen Unschärfen getroffen, kann dies zu einem monetären Nutzen in der Größenordnung siebenstelliger Euro-Beträge führen.

6.4 Bewertung und Diskussion der entwickelten Methode

Die praktische Anwendung der entwickelten Methode in der Strukturplanung für das BMW-Werk Mexiko ermöglicht eine Bewertung der inhaltlichen Anforderungen. Die Modellierung individueller Planungsprozesse (A1.1) wird durch die Methode und die Software *aranea* unterstützt.

Die Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen den Planungsparametern (A1.2) ist möglich. In der Praxis hat sich jedoch gezeigt, dass ein Teil der Planungsparameter nicht quantifizierbar ist und dadurch die Identifikation quantitativer Wirkbeziehungen wie Berechnungsvorschriften oder Korrelationen erschwert wird. Ggf. müssen Kennzahlen für die Quantifizierung (wie im Beispiel des Planungsparameters Elektromobilität) erst entwickelt werden.

Liegen quantitative Wirkbeziehungen vor, ist eine Analyse der Unschärfefortpflanzung (A1.3) zur Bestimmung der Unschärfe abhängiger Parameter sinnvoll und zielführend. Auch der entwickelte Leitfaden zur Klassifizierung und Modellierung von Parameterunschärfen konnte erfolgreich angewendet werden.

Die unschärfebasierte Auswahl und Dimensionierung von VBF (A1.4) erfolgt im Rahmen eines Workshops unter Einbindung der Planungsbeteiligten. Die entwickelte Methode unterstützt diesen Schritt indirekt, die eigentliche Auswahl erfolgt durch Experten auf Basis ihrer Erfahrung, des implizit vorhandenen Wissens und durch Austausch desselben. Ein automatisierter Mechanismus zur Auswahl und Quantifizierung der Ausprägungen der VBF wird durch die Methode nicht bereitgestellt. Ein solcher wäre auch, wie sich in den

[72] Wie folgt berechnet: monetärer Aufwand Methodenanwendung, ca. 30.000 Euro/Gesamtinvestition BMW-Werk Mexiko, ca. 830 Mio. Euro.

Experteninterviews und der Anwendung gezeigt hat, zu unflexibel und aufgrund unbekannter Kosten der unterschiedlichen VBF-Ausprägungen in den frühen Planungsphasen nicht praktikabel. Des Weiteren fördert die Auswahl und Dimensionierung der VBF in einem Workshop die Transparenz der Methode durch Partizipationsmöglichkeiten der Experten (A2.3).

Die Berücksichtigung von Wirkbeziehungen (A1.5) wird durch die Einflussanalyse und die Berechnung von Beeinflussungskennzahlen unterstützt und wurde im Anwendungsfall erfolgreich durchgeführt. Die Schlüsse, die aus der Hinterfragung zur Entstehung der BK für die unterschiedlichen VBF gewonnen werden konnten, enthalten lt. Anwenderkreis wertvolle Informationen zum Zusammenwirken der VBF, die zuvor nicht expliziert werden konnten.

Die Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit (A1.6) wird in der Methode selbst lediglich im Rahmen der Bewertung explizit betrachtet. Allerdings werden durch die Planenden implizit solche VBF in die Kombinationen aufgenommen, die genau die angestrebte Veränderungsstrategie verfolgen, ohne dass Begriffe wie Wandlungsfähigkeit, Flexibilität oder Robustheit im Workshop diskutiert wurden. Die Wirkung dieser Veränderungsstrategien ist den Planungsbeteiligten jedoch bewusst und fließt in die VBF-Kombination ein. Dies wurde bei der Bewertung der unterschiedlich veränderungsfähigen Strukturalternativen deutlich, bei der die Alternativen im sog. Veränderungsfähigkeits-Würfel jeweils einer Veränderungsstrategie zugeordnet werden konnten.

Um eine über die Anwendung in der industriellen Praxis hinausgehende Validierung der entwickelten Methode vorzunehmen und die Erfüllung der Anforderungen zum Einsatz in anderen Branchen und Unternehmen zu prüfen, wurden Validierungsgespräche mit acht Experten aus unterschiedlichen Unternehmen[73] durchgeführt (siehe Anhang B). Diese Experten waren zuvor nicht an Interviews im Rahmen der vorliegenden Arbeit beteiligt und kannten die entwickelte Methode vor dem Gespräch nicht. In den Validierungsgesprächen wurde die entwickelte Methode zunächst im Rahmen einer Präsentation vorgestellt. Anschließend wurden Fragen der Experten beantwortet. Zum Zweck der Validierung kam ein

[73] Bei diesen handelt es sich nach der Definition der EUROPÄISCHEN KOMMISSION (2003) um große Unternehmen (ab 50 Mio. Euro Jahresumsatz und mehr als 250 Mitarbeiter) aus den Branchen Maschinen- und Anlagenbau sowie der Nutzfahrzeugherstellung.

Fragebogen (Anhang F) zum Einsatz, mit dessen Hilfe die Befragten die Methode hinsichtlich der Kriterien Verständlichkeit, Adaptierbarkeit, Partizipationsmöglichkeiten, Kosten-Nutzen-Verhältnis, Innovativität und Anwendbarkeit bewerteten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

Mit den Ergebnissen der Validierungsgespräche ist eine Bewertung der anwendungsbezogenen Anforderungen (siehe Kap. 4.2) möglich. Alle Befragten haben die Methode als gut oder sehr gut verständlich bewertet. Das Verständnis der Methode ist eine Voraussetzung für die objektive Beantwortung der im Validierungsgespräch gestellten Fragen.

Tabelle 6.6: Ergebnisse der Validierungsgespräche; Anzahl Nennung der Kriterien durch die Befragten.

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	trifft teilweise zu	trifft größtenteils zu	trifft voll zu
Verständlichkeit der Methode: Ist die Methode verständlich und nachvollziehbar?	-	-	-	5	3
Adaptierbarkeit der Methode: Ist eine Adaption an unterschiedliche Unternehmen bzw. Planungsprozesse/-projekte möglich?	-	-	3	4	1
Partizipationsmöglichkeiten: Erlaubt die Methode die Partizipation der Planungsbeteiligten (z.B. in Workshops)?	-	-	1	5	2
Kosten-Nutzen-Verhältnis: Steht der Aufwand in einem angemessenen Verhältnis zum möglichen Nutzen?	-	1	4	2	1
Innovativität der Methode: Geht die Methode über die bisherige Praxis hinaus? Ist die Methode neu und innovativ?	-	-	1	5	2
Anwendbarkeit der Methode: Lässt sich die Methode in der Praxis anwenden?	-	-	2	5	1

Die Adaptierbarkeit der Methode an unterschiedliche Unternehmen und Planungsprozesse wird von einer Mehrheit der befragten Experten bestätigt. Vor allem die Teilmethode zur Aufnahme unternehmens- und projektspezifischer Planungsprozesse und deren Analyse sowie der Einsatz von Referenzmodellen (Referenzmodell des Fabrikplanungsprozesses, VBF-Referenzkatalog, Fuzzy Cognitive Map der Wirkbeziehungen zwischen den VBF), die an die spezifischen Gegebenheiten unterschiedlicher Projekte und Unternehmen angepasst werden können, fördern die Adaptierbarkeit. Eine Anwendung von Teilen der Methode ist

möglich, sofern die benötigten Informationen aus den vorhergehenden Schritten im Unternehmen bereits vorliegen. Die Anforderung A2.1 ist damit als erfüllt anzusehen (Tabelle 6.7).

Zur Bewertung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses geben 88 % der Experten an, dass der Aufwand teilweise, größtenteils oder vollständig in einem angemessenen Verhältnis zum Nutzen steht. Als kritisch werden vor allem der recht hohe Initialaufwand durch die Schritte 1 und 2 der Methode (Modellierung des Planungsprozesses und Auswirkungsanalyse der Planungsparameter, siehe Kap. 5.1) sowie der Aufwand zur Erhebung des Ist-Zustands der Fabrik (Ist-Ausprägung der Veränderungsbefähiger, siehe Kap. 5.6) und die Anpassung bzw. Überprüfung der Referenzmodelle für den jeweiligen Planungsfall gesehen. Wie im Anwendungsfall gezeigt wurde, muss dabei jedoch berücksichtigt werden, dass der Anwendungsaufwand nach erstmaliger Bearbeitung der Schritte 1 und 2 für folgende Projekte erheblich niedriger ist, da diese Schritte nur einmalig durchzuführen sind und deren Ergebnisse in künftigen Anwendungen der Methode erneut verwendet werden können. Auch die monetäre Bewertung der Anwendung in der Strukturplanung für das BMW-Werk Mexiko hat ein positives Ergebnis erbracht (siehe Kap. 6.3).

Vor allem im Gegensatz zu agilen Planungsansätzen, bei denen auf Basis der jeweils zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhandenen Informationen und Daten die Fabrikstruktur in iterativer Weise geplant wird, erscheint die entwickelte Methode aufwändig. Allerdings ist bei einem derart großen Investitionsvolumen, wie es Konzerne für neue Werke aufbringen, ein gewisser Aufwand der Planung durchaus sinnvoll. Je früher im Planungsprozess Unschärfe und Unsicherheit modelliert werden können und je exakter diese Modellierung ist, desto gezielter lassen sich die Veränderungsbefähiger für die zu planende Fabrik auswählen, kombinieren und dimensionieren. Werden Veränderungsbefähiger jedoch aufgrund einer einfachen und ggf. nachlässigen Schätzung der Unschärfe in der Planungsphase zu groß oder zu klein dimensioniert und damit eine falsche Entscheidung bzgl. der vorteilhaftesten Kombination getroffen, kann dies zu hohen Kosten bis hin zur Gefährdung der Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens führen. Vor diesem Hintergrund ist ein im Bereich mehrerer 10.000 Euro erhöhter Planungsaufwand durchaus gerechtfertigt.

Aus diesen Gründen wird die Effizienz der Anwendung mit *überwiegend erfüllt* bewertet (Tabelle 6.7).

Tabelle 6.7: Bewertung der Anforderungen an die Methode.

Inhaltliche Anforderungen		Bewertung
A1.1	Modellierung individueller Planungsprozesse	●
A1.2	Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Planungsparametern	●
A1.3	Einbezug von Unschärfen und deren Fortpflanzung	●
A1.4	Unschärfebasierte Auswahl von VBF	•
A1.5	Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen VBF	●
A1.6	Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit	•
Anwendungsbezogene Anforderungen		
A2.1	Adaptierbarkeit durch Modularität	●
A2.2	Effizienz der Anwendung	•
A2.3	Akzeptanz durch Partizipationsmöglichkeiten	●

Legende: ● Vollständig erfüllt ● Überwiegend erfüllt • Teilweise erfüllt Nicht erfüllt

Die Einbindung der Planungsbeteiligten im Rahmen von Planungsworkshops zur Auswahl und Dimensionierung als auch zur Kombination von Veränderungsbefähigern bietet Partizipationsmöglichkeiten und fördert die Transparenz der Methode, wie sieben der acht Befragten bestätigen (Tabelle 6.6). Positiv wird vor allem die aktive Rolle der beteiligten Mitarbeiter bewertet, da nur durch die methodische Unterstützung des kreativen Planungsprozesses, in dessen Mittelpunkt der Mensch steht, nicht jedoch durch weitreichende Automatisierung und Algorithmisierung der Planung eine ausreichende Akzeptanz erreicht werden kann, um eine neue und innovative Methode überhaupt in die Anwendung zu bringen.

Auch die Teilmethode zur Bewertung der alternativen Fabrikstrukturvarianten fördert die Transparenz hinsichtlich der mit den einzelnen Varianten einhergehenden Kosten sowie deren Verhältnis zueinander und bietet die Möglichkeit der Zuordnung zu unterschiedlichen Veränderungsstrategien. Die Entscheidung auf Basis dieser Zuordnung, des Kapitalwertes und weiterer qualitativer Kriterien trifft jedoch der Mensch, in diesem Fall das verantwortliche Entscheidungsgremium im Unternehmen. Daher wird auch die Anforderung A2.3 als vollständig erfüllt bewertet (Tabelle 6.7).

Die Innovativität der Methode und damit die Frage, ob die entwickelte Methode über den Stand der Technik hinausgeht, wird von den Befragten mehrheitlich positiv beantwortet.

Auch auf die Frage, ob sich die Methode generell in der Praxis anwenden lässt, antworteten 3/4 der Experten mit *trifft größtenteils zu* oder *trifft voll zu*.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen sind durch das turbulente Umfeld, in dem sie agieren, kontinuierlichen, unvermeidbaren Veränderungen ausgesetzt (SPATH ET AL. 2001, S. 235, KIRCHNER ET AL. 2003, S. 254, ELMARAGHY 2009, v). Um nachhaltig erfolgreich zu sein, müssen deren Fabrikstrukturen veränderungsfähig und effizient gestaltet sein (CLAUSSEN 2012, S. 1, WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2000). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Literaturrecherche und die Experteninterviews mit Kompetenzträgern aus der Fabrikplanung haben gezeigt, dass bestehende Methoden zur Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen einige Defizite aufweisen: Zum einen werden die durch das turbulente Unternehmensumfeld induzierten Unschärfen häufig nicht systematisch modelliert und deren Fortpflanzung wird im Planungsprozess nicht ausreichend berücksichtigt. Auch die Berücksichtigung von Wirkbeziehungen zwischen sog. Veränderungsbefähigern, deren Kombination zur Bildung veränderungsfähiger Fabrikstrukturvarianten führt (HERNÁNDEZ MORALES 2003, S. 56), ist in bestehenden Methoden bisher nicht erfolgt. Zum anderen wurde die Mehrdimensionalität der Veränderungsfähigkeit in vielen Ansätzen vernachlässigt und nur jeweils eine der unter dem Überbegriff Veränderungsfähigkeit zusammengefassten Veränderungsstrategien wie Robustheit, Flexibilität oder Wandlungsfähigkeit fokussiert.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode verfolgt daher das Ziel, die im Fabrikplanungsprozess vorhandenen Unschärfen so präzise wie möglich zu modellieren, um unter Verwendung von Veränderungsbefähigern die Fabrikstrukturen gezielt so auszulegen, dass eine Kompensation dieser Unschärfen unter Vermeidung von Überdimensionierung bestmöglich erfolgen kann. Die wesentliche Innovation der entwickelten Methode im Vergleich zu den bisher existierenden Ansätzen lässt sich in 2 Punkten zusammenfassen: Zum einen wird die Fortpflanzung von Datenunschärfe über die Schritte des Planungsprozesses hinweg mathematisch modelliert. Dies ermöglicht eine exaktere Modellierung von Unschärfe und Unsicherheit als zuvor. Zum anderen werden bei der anschließenden Planung der Veränderungsfähigkeit der Fabrik die Wirkbeziehungen der Veränderungsbefähiger

berücksichtigt. Auf diese Weise können Veränderungsbefähiger gezielt so kombiniert werden, dass Synergieeffekte realisiert und negative Auswirkungen minimiert werden. Die realitätsnahe Modellierung von Unschärfe und Unsicherheit zusammen mit den Erkenntnissen zu Wirkbeziehungen zwischen Veränderungsbefähigern ermöglichen den Planungsexperten die Entwicklung einer Überdimensionierung vermeidenden und damit kosteneffizienten veränderungsfähigen Fabrikstruktur.

Zur Erreichung der beschriebenen Ziele wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine sechsstufige Methode konzipiert. Schritt 1 umfasst die Modellierung unternehmens- und projektspezifischer Planungsprozesse unter Berücksichtigung der einzelnen Planungsparameter und deren Wirkbeziehungen durch die Anwendung der sog. SIPOC-Logik. In Schritt 2 folgt die Auswirkungsanalyse der Planungsparameter mit Methoden des strukturellen Komplexitätsmanagements: Aktiv- und Passivsumme der Parameter sowie die Art der zwischen diesen bestehenden Wirkbeziehungen werden identifiziert. Diese beiden Schritte stellen den Initialaufwand zur Anwendung der Gesamtmethode dar und müssen in einem Unternehmen nur einmalig durchgeführt werden, während die folgenden Schritte iterativ mit jedem neuen Planungsfall durchlaufen werden.

In Schritt 3 werden die Unschärfen der Planungsparameter mithilfe eines Leitfadens modelliert und klassifiziert, um eine möglichst präzise Abbildung der Unschärfen, beispielsweise durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen, zu erreichen. Unter Anwendung geeigneter Unschärfefortpflanzungsmechanismen (Gauß'sches Unschärfefortpflanzungsgesetz, Monte-Carlo-Simulation und Fuzzy-Inferenz) werden die Unschärfen der von anderen Einflussfaktoren abhängigen Planungsparameter ermittelt. Die identifizierten Unschärfen bilden die Grundlage für die Planung der Veränderungsfähigkeit der Fabrikstrukturen in den Folgeschritten. Dazu wird als wissenschaftliche Grundlage zunächst ein sog. Veränderungsbefähiger-Referenzkatalog auf Basis einer Literaturrecherche und Experteninterviews entwickelt, der eine den aktuellen Stand des Wissens umfassende Auflistung und Strukturierung aller Veränderungsbefähiger darstellt. In einem Expertenworkshop wird dieser Katalog in Schritt 4 genutzt, um eine projektspezifische Auswahl und Dimensionierung der Veränderungsbefähiger mithilfe eines Idealwertes, der eine ideale Kompensation der vorhandenen Unschärfen erlaubt, zu erzielen. Die durch die Planungsbeteiligten als relevant bewerteten Veränderungsbefähiger werden in Schritt 5 systematisch miteinander kombi-

niert. Dazu wird zunächst eine Einflussanalyse unter Berücksichtigung der Wirkbeziehungen zwischen den Veränderungsbefähigern durchgeführt. Diese Wirkbeziehungen wurden zuvor im Rahmen einer zweiten Reihe standardisierter Experteninterviews erhoben.

Das Ziel der Einflussanalyse ist die Identifikation von Veränderungsbefähigern, die aufgrund vieler positiver Wirkbeziehungen und großen Potenzials zur Kompensation der vorhandenen Unschärfen eine hohe Priorität für die Umsetzung aufweisen. Für die Kombination der Veränderungsbefähiger wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, das die Handlungsanweisung für das Vorgehen in einem zweiten Expertenworkshop bildet. Das Ergebnis dieses Workshops sind alternative Veränderungsbefähiger-Kombinationen bzw. Fabrikstrukturvarianten, die sich hinsichtlich der eingeplanten Veränderungsbefähiger, deren Ausprägungen und damit auch hinsichtlich ihres Unschärfekompensationspotenzials unterscheiden. Diese werden im 6. Schritt monetär und qualitativ bewertet, um eine Entscheidungshilfe für die Auswahl einer Fabrikstrukturalternative bereitzustellen.

Die entwickelte Methode wurde anhand eines Anwendungsfalls in der industriellen Praxis erprobt und im Rahmen von Plausibilisierungsgesprächen mit Fabrikplanungsexperten aus unterschiedlichen Branchen und Unternehmen validiert. Als Anwendungsfall diente die Strukturplanung für das neue BMW-Werk in Mexiko, für die zunächst die Unschärfen im Planungsprozess analysiert und modelliert wurden. Auf Basis der identifizierten und modellierten Unschärfen wurden mithilfe der entwickelten Methode geeignete Veränderungsbefähiger zur Unschärfekompensation identifiziert. Diese wurden anschließend einer Einflussanalyse unterzogen und zu alternativen Fabrikstrukturvarianten kombiniert. Die Bewertung der Strukturvarianten auf Basis quantitativer und qualitativer Kriterien sowie die Zuordnung zu unterschiedlichen Veränderungsstrategien bilden die Ergebnisse des Anwendungsfalls. Aufgrund der positiven Bewertung und erfolgreichen Anwendung der Methode in der Praxis kann die zentrale Arbeitshypothese („Unsicherheit und Unschärfe der Planungsdaten können durch eine geeignete Veränderungsfähigkeit der Fabrikstrukturen kompensiert werden“, siehe Kap. 1.1) bestätigt werden.

Zukünftig ist eine Erweiterung der Schritte 1 und 2 der Methode anzustreben, sodass nicht nur eine Analyse des Wirkungsgefüges und der Unschärfen der Planungsdaten, sondern auch eine Optimierung des Planungsprozesses ermöglicht wird. Damit könnten Iterationen verringert, die zeitliche Anordnung von Meilensteinen sowie die Länge und der Inhalt der

einzelnen Planungsphasen optimiert und damit der Planungsprozess effizienter gestaltet werden.

Ein weiteres Potenzial stellen das Wissen und die Erfahrung aus der mehrmaligen Anwendung der Methode im industriellen Kontext dar: Wurden bereits für unterschiedliche Planungsfälle die Unschärfen der Parameter modelliert, ist die Bildung eines Unschärfe-Referenzmodells denkbar, dass wesentliche in der Fabrikplanung relevante Parameter und Informationen zu deren typischer Unschärfe enthält. Auf diese Weise ließe sich der Aufwand zur Modellierung und Klassifizierung relevanter Unschärfen der Planungsparameter reduzieren.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Aufnahme des Ist-Zustands bzw. der Ist-Ausprägung der Veränderungsbefähiger einer Fabrik. Diese kann je nach Größe des betrachteten Fabrikbereichs einen nicht unerheblichen Aufwand bei der Durchführung der Methode darstellen. Die Entwicklung eines Ansatzes zur automatisierten Aufnahme dieses Ist-Zustands (z. B. mithilfe aktueller Werkzeuge zur Digitalisierung von Fabriken wie dem 3-D-Laserscanning) im Sinne eines effizienten digitalen Zwillings[74] der Fabrik bietet Potenzial zur signifikanten Reduzierung dieses Aufwands.

[74] Der Begriff *digitaler Zwilling* wird nach GRÖSSER (2017) wie folgt definiert: „Ein digitaler Zwilling (Englisch: ‚Digital Twin') bezieht sich auf ein computergestütztes Modell eines materiellen oder immateriellen Objekts, welches für verschiedene Zwecke verwendet werden kann."

Anhang

A. Grundfälle der Fabrikplanung

Tabelle 7.1: Grundfälle der Fabrikplanung nach GRUNDIG (2009, S. 18–20).

Nr.	Grundfall	Beschreibung
1	Neubau	Neubau eines Industriebetriebes auf der „grünen Wiese“
2	Umbau/ Neugestaltung	Rationalisierung, Modernisierung und fortlaufende Anpassung vorhandener Fabriken
3	Erweiterung	Schaffung erweiterter Kapazitäten, oftmals verbunden mit Modernisierungen bzw. Rationalisierungen, Intensivierung der Flächen- und Raumnutzung der vorhandenen Fabrik
4	Rückbau	Redimensionierung (Senkung) und Restrukturierung von Produktionskapazitäten
5	Revitalisierung	Umgestaltungs- und Sanierungsprozess zur Umnutzung/Neunutzung zuvor stillgelegter Fabrikstrukturen

B. Übersicht der befragten Experten

Tabelle 7.2: Übersicht Teilnehmer Interviews: Unternehmen und Experten.

Nr.	Unternehmen	Branche	Name Experte*	Funktion	Interviewreihe 1	Interviewreihe 2	Validierungs-gespräch
1	agiplan GmbH	Beratung	a.	GF	x		
2	Audi AG	Automobilindustrie	Jochen Walz	AL		x	
3	BMW AG	Automobilindustrie	Gerald Gantke	MA	x		
4			Jan Knau	AL	x	x	
5			Marcus Plitt	MA	x	x	
6			a.	GL	x		
7	COPLAN AG	Beratung	Guntram Loher	AL	x	x	
8	evolve!	Beratung	Dr. Peter Claussen	GF	x		
9	Fabrik-ID GmbH	Beratung	Dr. Peggy Näser	GF	x		
10	fastplan GmbH	Beratung	Peter Rößler	GF	x		
11	ifp GmbH	Beratung	Ida Wonsak	PM		x	
12			Florian Broß	PL	x	x	
13	Ingenics AG	Beratung	Stefan Kienzler	PM	x	x	
14	Krones AG	Maschinen-/Anlagenbau	Michael Kuhnt	PM	x	x	
15			Daniel Heyer	PL		x	
16			Wolfgang Schewior	PM		x	
17	Metroplan GmbH	Beratung	Dr. Oliver Lieske	GF	x	x	
18			Lars Knoblauch	SM	x	x	
19			a.	PM		x	
20	MyLeanFactory GmbH	Beratung	Sven Hammann	GF	x	x	
21	plavis GmbH	IT	Thomas Weber	MA	x		
22	PROTEMA GmbH	Beratung	Dr. Jörg Pirron	GF	x	x	
23	TMG Consultants GmbH	Beratung	a.	GF	x		
24	Zip Industrieplanung	Beratung	Eckart Pröll	GF	x		
25	ASM GmbH	Maschinen-/Anlagenbau	a.	AL			x
26			a.	MA			x
27			a.	MA			x
28	BMW AG	Automobilindustrie	a.	GL			x
29	HAWE Hydraulik SE	Maschinen-/Anlagenbau	a.	MA			x
30	Hochschule München	Forschung & Bildung	a.	Prof.			x
31	MAN SE	Nutzfahrzeugindustrie	a.	MA			x
32			a.	AL			x

Legende:
GF: Geschäftsführung
AL: Abteilungsleitung
GL: Gruppenleitung
SM: Senior Manager
PL: Projektleitung
PM: Projektmanagement
MA: Mitarbeiter
Prof.: Professor
a.: anonym

* Für die Nennung der Namen der aufgeführten Experten wurde eine schriftliche oder mündliche Einverständniserklärung durch den Autor eingeholt.

C. Leitfaden der 1. Interviewreihe

Dauer: ca. 60 Minuten.

Interviewpartner: _____

Unternehmen / Funktion: _____

Ort: _____

Zeit: _____

Aufzeichnung: _____

1. Welchem Produktionsprinzip folgen die von Ihnen typischerweise geplanten Fabriken (Werkstatt-, Gruppen-, Insel-, Linienlayout)?
2. Wenn Sie den Planungsprozess in Phasen unterteilen müssten, welche wären die relevanten Planungsphasen bei der Entwicklung einer neuen Fabrikstruktur?
3. Welche Werkzeuge / Tools (Software, Methoden, Algorithmen o. Ä.) verwenden Sie in der Planung? Was könnte an diesen Tools besser sein?
4. Welche Planungsdaten werden für die Fabrikplanung benötigt? In welchen Planungsphasen müssen diese Daten vorliegen?
5. Welche dieser Planungsdaten unterliegen einer Unschärfe?
6. Existieren Parameter in qualitativer Form, die Sie zur Planung heranziehen?
7. Wie entstehen im Planungsprozess durch unscharfe Planungsdaten Risiken für die Fabrik oder das Unternehmen?
8. Wie begegnen Sie diesen Risiken in der Praxis? (Wie) Berücksichtigen Sie die Unschärfe der Planungsdaten bei der Fabrikplanung?
9. Was macht ein Layout Ihrer Meinung nach veränderungsfähig („Veränderungsbefähiger“)?
10. Welche Kriterien ziehen Sie zur Bewertung von Fabrikstrukturalternativen heran?

D. Auszug der Umfrage zur Ermittlung von Unschärfe-Kompensationspotenzialen der Veränderungsbefähiger

Umfragebereich: **Markt & Kunde** Unscharfer Parameter: **Absatzmenge**

Wie gut sind die folgenden **Veränderungsbefähiger** geeignet, um eine Unschärfe der **Absatzmenge** zu kompensieren? (Vom Markt geforderte Absatzmenge / Stückzahl schwierig prognostizierbar.)

1 = gar nicht; 2 = wenig; 3 = mittel; 4 = gut; 5 = sehr gut

1. Skalierbarkeit

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5

Erläuterung: Skalierbarkeit ist die Fähigkeit einer Fabrik, in technischen, räumlichen und organisatorischen Dimensionen erweiterbar zu sein und die Fabrik somit „atmungsfähig" zu gestalten.

Beispiele für Skalierbarkeit:

- erweiterbare Flächen und Gebäude, Frei- und Reserveflächen,
- Möglichkeiten zur Integration von technischer Gebäudeausstattung mit größerer Kapazität,
- erweiterbare Arbeitsplätze,
- Betriebsmittel mit Überkapazitäten,
- höhenerweiterbare Lager.

2. Mobilität

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5

Erläuterung: Mobilität fördert die aufwandsarme Beweglichkeit von Objekten innerhalb der Fabrik.

Beispiele für Mobilität:

- mobile Betriebsmittel (z. B. ohne Fundament, auf Rädern),
- ortsungebundene Fördertechnik (z. B. Stapler statt Hängebahn),
- große Wegbreiten,
- große Kranabdeckung,
- mobile Arbeitsplätze.

3. Universalität

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

☐1 ☐2 ☐3 ☐4 ☐5

Erläuterung: Fähigkeit eines Fabrikobjekts, für vielfältige Aufgaben und Anforderungen im Sinne von Funktionsneutralität ausgelegt zu sein.

Beispiele für Mobilität:

- universell nutzbare Flächen (z. B. mit überall gleicher, hoher Bodenlast),
- große Säulenabstände (Säulenraster),
- Produktionsmittel für unterschiedliche Einsatzzwecke geeignet,
- Arbeitsplätze anpassbar,
- Transportmittel drinnen und draußen einsetzbar.

4. etc.

E. Ergebnisse der Umfrage zu Unschärfe-Kompensationspotenzialen der Veränderungsbefähiger

Tabelle 7.3: Ergebnisse der Umfrage zur Identifikation von Unschärfe-Kompensationspotenzialen der VBF.

		Markt und Kunde			Produktbez. Daten			Prozessbezogene Daten			
		Absatzmenge	Produktarten und -varianten	Auftragsstruktur	Teileform- und geometrie	Eigenproduktionsteile und -baugruppen	Werkstoff	Produktionstechnologie	Betriebsmittelanzahl	Produktionsreihenfolge	Losgröße
Primärbefähiger	Skalierbarkeit	82%**		64%*		56%*			88%**		75%**
	Mobilität								63%**	92%**	
	Universalität	61%*	88%**	60%**	80%**	76%**	64%**	76%**		67%**	
	Standardisierung und Modularität	61%	80%**		56%	56%		64%**		58%*	

Legende: ** signifikant auf 5%-Niveau
* signifikant auf 10%-Niveau
grau nicht signifikant, aber Kompensationspotential lt. > 50% der Experten vorhanden

Tabelle 7.3 ist wie folgt zu lesen: Primärbefähiger (Zeile) ist geeignet, um die Unschärfe des Planungsparameters (Spalte) zu kompensieren, wenn ein entsprechend hoher signifikanter Anteil ($\alpha < 0{,}05$ bzw. $\alpha < 0{,}1$) der Umfrageteilnehmer das Kompensationspotenzial mit *gut* oder *sehr gut* bewertet hat. Dieser Anteil der Befragten ist als aggregierter Prozentwert in der Tabelle eingetragen. Werte unter 50 % werden nicht angezeigt, da davon ausgegangen werden kann, dass kein Kompensationspotenzial besteht. Mithilfe des t-Tests wurde die Signifikanz geprüft, ob die im Folgenden beschriebene Nullhypothese zugunsten der Alternativhypothese für den jeweiligen Veränderungsbefähiger verworfen werden konnte:

Nullhypothese: Der Veränderungsbefähiger ist nicht speziell für die Kompensation der Unschärfe geeignet (die von den Befragten abgegebene Bewertung schwankt zufällig um einen Mittelwert).

Alternativhypothese: Der Veränderungsbefähiger ist gut oder sehr gut für die Kompensation der Unschärfe geeignet (eine signifikante Mehrheit der Befragten hat die Bewertung gut oder sehr gut abgegeben).

Es wurden bei der Umfrage nur die Primärbefähiger einbezogen, da eine Abfrage der Kompensationspotenziale aller Sekundärbefähiger den Umfang einer durchführbaren Online-Umfrage bei Weitem überschritten hätte. Es wird angenommen, dass von den Ergebnissen

bzgl. der Primärbefähiger auf die Kompensationspotenziale der Sekundärbefähiger geschlossen werden kann.

F. Fragebogen zur Validierung der Methode durch Experten

Validierung Methodik Dissertation Sven Hawer

Planung veränderungsfähiger Fabrikstrukturen auf Basis unscharfer Daten

	trifft nicht zu	trifft eher nicht zu	trifft teilweise zu	trifft größten-teils zu	trifft voll zu
Verständlichkeit der Methodik: Ist die Methodik verständlich und nachvollziehbar?	☐	☐	☐	☐	☐
Adaptierbarkeit der Methodik: Ist eine Adaption an unterschiedliche Unternehmen bzw. Planungsprozesse/-projekte möglich?	☐	☐	☐	☐	☐
Partizipationsmöglichkeiten: Erlaubt die Methode die Partizipation der Planungsbeteiligten (z.B. in Workshops)?	☐	☐	☐	☐	☐
Kosten-Nutzen-Verhältnis: Steht der Aufwand in einem angemessenen Verhältnis zum möglichen Nutzen?	☐	☐	☐	☐	☐
Innovativität der Methodik: Geht die Methodik über die bisherige Praxis hinaus? Ist die Methodik neu und innovativ?	☐	☐	☐	☐	☐
Anwendbarkeit der Methodik: Lässt sich die Methodik in der Praxis anwenden?	☐	☐	☐	☐	☐

Sofern Sie mindestens ein Kriterium mit „trifft eher nicht zu“ oder „trifft nicht zu“ bewertet haben, begründen Sie Ihre Entscheidung bitte kurz.

Abb. 7.1: Fragebogen zur Validierung der Planungsmethode im Rahmen von Plausibilisierungsgesprächen.

G. Kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilungen und deren Funktionen

Verteilung	Dichtefunktion	Verteilungsfunktion
Normalverteilung	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt$
Gleichverteilung	$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a < x < b \\ 0 & sonst \end{cases}$	$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x \leq b \\ 1 & x > b \end{cases}$
Dreiecksverteilung	$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)} & a \leq x < c \\ \frac{2}{b-a} & x = c \\ \frac{2(b-x)}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \end{cases}$	$f(x) = \begin{cases} \frac{(x-a)^2}{(b-a)(c-a)} & a \leq x < c \\ \frac{c-a}{b-a} & x = c \\ 1 - \frac{(b-x)^2}{(b-a)(b-c)} & c < x \leq b \end{cases}$
Logistische Verteilung	$f(x) = \frac{e^{-\frac{x-a}{\beta}}}{\beta\left(1 + e^{-\frac{x-a}{\beta}}\right)^2}$	$F(x) = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x-a}{\beta}}}$
Exponentialverteilung	$f(x) = \alpha \cdot e^{-\alpha x}$	$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ 1 - e^{-\alpha x} & x > 0 \end{cases}$
Lognormalverteilung	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \frac{1}{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	$f(x) = \begin{cases} 0 & x \leq 0 \\ \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^x \frac{1}{t} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln t-\mu}{\sigma}\right)^2} dt & sonst \end{cases}$
Extremal-I-Vert.	$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x-\mu}{\beta}} e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$	$F(x) = e^{-e^{-\frac{x-\mu}{\beta}}}$
Weibullverteilung	$f(x) = \alpha\beta x^{\beta-1} e^{-\alpha x^{\beta}}$	$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha x^{\beta}} & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases}$

Zeichen	Beschreibung
f	Dichtefunktion
F	Verteilungsfunktion
X	stetige Zufallsvariable
x	Ausprägung der Zufallsvariable X
a	untere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung
b	obere Intervallgrenze Gleich- und Dreiecksverteilung
c	wahrscheinlichster Wert der Dreiecksverteilung („Dreiecksspitze“)

e	Eulersche Zahl (Konstante)
α	Parameter der logistischen, Exponential- und Weibullverteilung
β	Parameter der logistischen, Extremal-I-Verteilung und Weibullverteilung
μ	Erwartungswert, arithmetischer Mittelwert
π	Kreiszahl (Konstante)
σ	Standardabweichung

Quellen: MOSLER & SCHMID (2006, S. 89–115), WALDI (2015, S. 46–66), TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL (2017B).

H. Diskrete Wahrscheinlichkeitsverteilungen und deren Funktionen

Verteilung	Zähldichte	Verteilungsfunktion
Gleichverteilung	$f(k) = \frac{1}{n}$	$P(\{X \leq x\}) = \frac{\lvert\{i: k_i \leq x\}\rvert}{n}$
Binomialverteilung	$f(k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k}$	$P(\{X \leq x\}) = \sum_{i=0}^{\lfloor x \rfloor} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$
Negative Binomialverteilung	$P(\{X = k\}) = \binom{k-1}{r-1} p^r (1-p)^{k-r}$	$P(\{X \leq x\}) = \sum_{i=r}^{\lfloor x \rfloor} \binom{i-1}{r-1} p^r (1-p)^{i-r}$
Geometrische Verteilung	$f(k) = p(1-p)^{k-1}$	$P(\{X \leq x\}) = 1 - (1-p)^{\lfloor x \rfloor}$
Hypergeometrische Verteilung	$f(k) = \frac{\binom{M}{k}\binom{N-M}{n-k}}{\binom{N}{n}}$	$P(\{X \leq x\}) = \sum_{i=max(0,n-N)}^{\lfloor x \rfloor} \frac{\binom{M}{i}\binom{N}{n-i}}{\binom{M+N}{n}}$

Zeichen	Beschreibung
f	Zähldichte der Verteilung
X	diskrete Zufallsvariable
x	Ausprägung der Zufallsvariable X
N	Umfang der Grundgesamtheit
n	Stichprobenumfang, Teilmenge der Grundgesamtheit
M	Anzahl Elemente der Grundgesamtheit, für die ein Ereignis eintritt
i	Laufvariable bei der Summenbildung
k	Anzahl Elemente der Stichprobe n, für die ein Ereignis eintritt
P	Wahrscheinlichkeitsmaß für die Gesamtwahrscheinlichkeit einer Aussage
p	Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines (Einzel-)Ereignisses
r	Anzahl Elemente mit Eigenschaft 1 der Stichprobe n aus einer dichotomen Grundgesamtheit (Elemente der Grundgesamtheit werden durch 2 unterschiedliche Eigenschaften voneinander differenziert), für die ein Ereignis eintritt

Quellen: MOSLER & SCHMID (2006, S. 75–88), WALDI (2015, S. 80–96), TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL (2017A).

I. Maßzahlen der zentralen Tendenz und der Streuung

Maßzahl der Streuung	**Zeichen**	**Formel**
Standardabweichung	σ	$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2}$
Varianz	σ^2	$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \mu)^2$
Maßzahl der zentralen Tendenz		**Formel**
Arithmetisches Mittel	μ	$\mu = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$
Median (auch: Zentralwert, 2. Quartil)	Z	$Z = x_k$ mit $k = \frac{n+1}{2}$ für ungerade n; $Z = x_k$ mit $k = \frac{n}{2}$ für gerade n x_i der Größe nach geordnet

Quelle: RÖßLER & UNGERER (2008, S. 43), RÖßLER & UNGERER (2008, S. 54).

J. Fuzzy-Regelbasis für die beispielhafte Bestimmung der Unschärfe mittels Fuzzylogik

	WENN	und WENN	und WENN	DANN
Nr.	**Produktionsart**	**Variantenzahl**	**geforderte DLZ**	**Produktionsprinzip**
1	Einzelproduktion	niedrig	niedrig	x
2	Einzelproduktion	niedrig	mittel	x
3	Einzelproduktion	niedrig	hoch	x
4	Einzelproduktion	mittel	niedrig	x
5	Einzelproduktion	mittel	mittel	x
6	Einzelproduktion	mittel	hoch	x
7	Einzelproduktion	hoch	niedrig	Werkstattproduktion
8	Einzelproduktion	hoch	mittel	Baustellenproduktion
9	Einzelproduktion	hoch	hoch	Baustellenproduktion
10	Serienproduktion	niedrig	niedrig	Gruppenproduktion
11	Serienproduktion	niedrig	mittel	Fließproduktion
12	Serienproduktion	niedrig	hoch	Fließproduktion
13	Serienproduktion	mittel	niedrig	Gruppenproduktion
14	Serienproduktion	mittel	mittel	Gruppenproduktion
15	Serienproduktion	mittel	hoch	Werkstattproduktion
16	Serienproduktion	hoch	niedrig	Gruppenproduktion
17	Serienproduktion	hoch	mittel	Werkstattproduktion
18	Serienproduktion	hoch	hoch	Werkstattproduktion
19	Massenproduktion	niedrig	niedrig	Fließproduktion
20	Massenproduktion	niedrig	mittel	Fließproduktion
21	Massenproduktion	niedrig	hoch	Fließproduktion
22	Massenproduktion	mittel	niedrig	Fließproduktion
23	Massenproduktion	mittel	mittel	Fließproduktion
24	Massenproduktion	mittel	hoch	Fließproduktion
25	Massenproduktion	hoch	niedrig	Fließproduktion
26	Massenproduktion	hoch	mittel	Gruppenfertigung
27	Massenproduktion	hoch	hoch	Gruppenfertigung

x: Kombination der Ausprägungen der linguistischen Variablen in dieser Regel führen zu keinem plausiblen Ergebnis.

K. Referenzkatalog der Veränderungsbefähiger

	Bezeichnung	Zuordnung VBF-Ordn.	VBF_1	Quantifizierung / Einheit	Quelle*							
FGF	Fläche				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Universell nutzbare Flächen**	2										
1	Bodenanforderungen flächendeckend erfüllen (z. B. durch überdimensionierte, aber einheitliche Bodenplatte)	3	Universalität	Ist-Dämpfung > geforderte Dämpfung Ist-Bodenlast > geforderte Bodenlast (t)	x	x						
2	breite, für zukünftige Anforderungen geeignete, ggf. überdimensionierte Wege	3	Skalierbarkeit Universalität	Wegdimensionen (Meter)	x							
3	gesamte Fläche kann von allen Transportmitteln befahren werden (Bodenbeschaffenheit / -belastbarkeit)	3	Universalität	Ist-Nutzlast > geforderte Nutzlast (t)		x						
4	Logistikfläche kann in Montagefläche umgewandelt werden und umgekehrt	3	Universalität	Eigenschaften der Flächen sind gleich	x							
5	großes Stützenrastermaß (Säulenabstand)	3	Skalierbarkeit Universalität	Abstand zwischen Stützen (Meter)	x	x						
6	keine Spezialflächen nur für bestimmte Funktionen, Flächenneutralität	3	Universalität	neutrale Fläche / Gesamtfläche (%)	x							
7	Änderung der Bodenmarkierungen in allen Hallenbereichen einfach und mit einheitlichem Aufwand (z. B. durch Klebestreifen)	3	Universalität	Zeitaufwand, um 1 m Bodenmarkierung zu verändern (s)			x					
8	ausgeglichenes Verhältnis von Länge und Breite der Fabrikgebäude	3	Universalität	Länge / Breite (Gebäude)				x				
VBF_2	**Standardisierte und modulare Flächen**	2										
9	kompakte räumliche Anordnung gleichartiger Funktionseinheiten (Modulbildung ermöglichen + Mittelaustausch erleichtern)	3	Modularität Standardisierung	ja / zum Teil / nein				x				
10	standardisierte Flächengrößen / Rastermodule	3	Modularität Standardisierung	ja / zum Teil / nein	x							
VBF_2	**Skalierbarkeit der Flächen**	2										
11	Frei- bzw. Reserveflächen („Flächenpuffer") innerhalb der Fabrikhalle	3	Skalierbarkeit	Anteil der Freifläche an der Gesamtfläche (%)	x	x						
12	Wachstumsflächen in verschiedene Richtungen (für Produktionserweiterung)	3	Skalierbarkeit	Anteil der Wachstumsfläche an der Gesamtfläche (%)	x	x						
13	Produktionsbereiche haben nur eine fixe Kante, erweiterbar in andere Richtungen	3	Skalierbarkeit	Anzahl fixer Kanten je Produktionsbereich	x		x					
14	freie Bauflächen außerhalb des Fabrikgebäudes auf dem Werkgelände (für Gebäudeerweiterungen)	3	Skalierbarkeit	Flächenpotenzial um das Fabrikgebäude herum / Freifläche auf dem Werkgeländes (%)	x							
15	Belieferung / Versorgung der Anlagen von mehreren Seiten möglich	3	Skalierbarkeit Universalität	Anzahl der Versorgungsschnittstellen der Anlage	x							
16	Verkehrserschließung der Gebäude von mehreren Seiten gewährleisten	3	Skalierbarkeit Universalität	Anteil der verkehrstechnisch erschlossenen Gebäudeseiten (%)				x				
FGF	Gebäude und TGA				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Kompatibilität der TGA und Vernetzungsfähigkeit durch TGA**	2										
17	Hohe Schnittstellentoleranz bezüglich Anschlussart (z. B. für Druckluftleitungen verschiedene Anschlussmöglichkeiten wie Schraub- und Schnellklemmverbindungen bereitstellen)	3	Kompatibilität Vernetzungs-fähigkeit	Anzahl möglicher Anschlussarten pro Schnittstelle		x						
18	IT-Infrastruktur als Bussystem ausführen, um neue Geräte einfach anschließen zu können	3	Kompatibilität Vernetzungs-fähigkeit	Flächenanteil, auf dem Busübertragung möglich ist (%)		x						
19	Skelettbauweisen sind der Wandbauweise vorzuziehen (höhere Gebäudedurchlässigkeit)	3	Kompatibilität Skalierbarkeit	Anteil Skelettelemente in den Wänden (%)		x						

VBF_2	**Mobilität durch TGA-Gestaltung**	**2**										
20	Drahtlosübertragung für IT (z. B. WLAN) statt Kabel	**3**	Vernetzungs-fähigkeit Mobilität	Flächenanteil, auf dem Drahtlosübertragung möglich ist (%)		x						
21	Sprinkler statt Brandwände zur Reduktion der Innenwände (um Materialfluss nicht zu behindern)	**3**	Mobilität Vernetzungs-fähigkeit	Innenwände pro Fläche (Meter)		x						
22	Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk	**3**	Mobilität Universalität	Anteil der Medien, die von oben realisiert sind (%)		x						
23	viele Medienzentren für dezentrale Versorgung und einfache Umstellung von Maschinen	**3**	Mobilität Universalität	durchschnittliche Anzahl an Medienzentren pro Bearbeitungsstation	x	x						
VBF_2	**Modulare und standardisierte TGA und Gebäude**	**2**										
24	konstruktive Trennung des Tragwerks und der Hülle (Gebäude) von den Medien (TGA) (Berücksichtigung unterschiedlicher Lebenszyklen)	**3**	Modularität	ja / zum Teil / nein		x		x				
25	einheitliches modulares Gebäuderaster, das z. B. auf die Funktionen und Betriebsmittel abgestimmt ist	**3**	Modularität Standardisierung	Anzahl standardisierter Raster / Gesamtanzahl Raster						x		
26	kostengünstig versetzbare, standardisierte Systemwände innen	**3**	Standardisierung Universalität	Standardisierte Wandfläche / Gesamte Wandfläche	x	x						
27	standardisierte Mediensäulen mit überall gleichen Anschlüssen und Medien	**3**	Standardisierung	Standardisierte Mediensäulen / Gesamtzahl Mediensäulen		x						
VBF_2	**Skalierbarkeit der Gebäude und TGA**	**2**										
28	Kapazitäten (Fläche, Raum, ggf. Medienversorgung) für Erweiterung von Netzwerk- und Traforäumen vorhalten	**3**	Skalierbarkeit	Überdimensionierung der Netzwerkräume (%)	x							
29	überdimensionierte Tragwerksbelastbarkeit (für spätere Aufnahme weiterer Einbauten wie Krananlagen, Medien etc.)	**3**	Skalierbarkeit	Überdimensionierung des Tragwerks (%)		x		x				
30	Stromversorgung als Strahlen- oder Maschennetz vorsehen (spätere Erweiterung / zusätzliche Anschlüsse)	**3**	Skalierbarkeit	Anteil der Stationen, die aufwandsarm mit Strom versorgt werden können (%)		x						
31	möglichst keine Bodenheizung, eher Infrarotstrahler, Strahlplatten oder Luftheizung (bessere Erweiter- und Demontierbarkeit)	**3**	Skalierbarkeit	Anteil der Fläche ohne Bodenheizung (%)		x						
32	Erweiter- und Reduzierbarkeit der Gebäude durch Zwischengebäude	**3**	Skalierbarkeit	ja / zum Teil / nein			x					
33	Erweiter- und Reduzierbarkeit der Gebäude durch einfache Formen wie Quader	**3**	Skalierbarkeit	ja / zum Teil / nein			x					
34	auch für zukünftige Anforderungen ausreichend (ggf. über-) dimensionierte Ein- und Ausgänge	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Überdimensionierung der Ein- und Ausgänge (%)	x							
35	auch für zukünftige Anforderungen ausreichend (ggf. über-) dimensionierte Gebäudehöhe (lichte Höhe)	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Überdimensionierung der Gebäudehöhe (%)	x	x						
36	kostengünstig versetzbare / rückbaubare Außenwände	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Aufwand pro bewegtem Wandmeter (EUR)	x							
37	lösbare Fassadenelemente für die Gebäudehülle	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Anteil lösbarer Fassadenelemente (%)		x						
38	einfache Technik zum Verbinden der Träger ohne Spezialwerkzeug (z. B. Schrauben, Stecken)	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Anteil der einfachen Schraub- und Steckverbindungen der Träger (%)			x					
39	überdimensionierte Medienleitungen/-kanäle (für spätere Aufnahme weiterer Medien)	**3**	Skalierbarkeit Universalität	Überdimensionierung der Leitungen (%)	x	x						
VBF_2	**Universalität der Gebäude und TGA**	**2**										
40	Integration der Belüftungsanlagen in Dach-/ Deckentragwerk (lichte Höhe größer und universellere Nutzung möglich)	**3**	Skalierbarkeit Universalität	ja / zum Teil / nein		x						
41	Medienversorgung in Tunneln unter dem Hallenboden (nur wenn nicht über Deckentragwerk möglich)	**3**	Universalität	Anteil der Medien, die durch Tunnel gelegt werden (%)	x	x						
42	anstatt separater Medienleitungen Trassen innerhalb von oder nahe an Stützpfeilern	**3**	Universalität	Anteil der Medien, die über Stützpfeiler verlegt werden (%)	x	x						
43	Medienleitungen in Wannen oder offenen Trassen, keine Verlegung unter Putz (gute Zugänglichkeit der TGA für Änderungen)	**3**	Universalität Kompatibilität	1 - Anteil der Medien, die unter Putz verlegt werden (%)	x							
44	keine Gruben, keine Wannen im Boden	**3**	Universalität	ja / zum Teil / nein	x							
45	ebener Boden, wenige Ecken	**3**	Universalität	Anzahl Bodenstufen bzw. Anzahl Ecken pro Fabrikhalle	x							

46	Auslegung der Klimatisierung für unterschiedliche Anwendungsfälle (z. B. Produktion und Lager)	3	Universalität	ja / zum Teil / nein	x							
47	Auslegung der Heizung für unterschiedliche Anwendungsfälle (z. B. Produktion, Büroflächen)	3	Universalität	ja / zum Teil / nein								
48	Auslegung der Beleuchtung für unterschiedliche Anwendungsfälle (z. B. Produktion, Büroflächen)	3	Universalität	ja / zum Teil / nein	x							
49	Leitungen der Medienversorgung als Ring oder Netz auslegen	3	Universalität	Anteil der Stationen, die aufwandsarm mit Medien versorgt werden können (%)	x							
50	eingeschossige Gebäude (i. d. R. höhere Bodenbelastung möglich, relativ unkomplizierte Leitungsführung, größere Raumhöhen)	3	Universalität	Anzahl Etagen / Gesamtfläche		x					x	
51	Positionieren von festen Einbauten (z. B. Treppen, Energiezentralen, Toiletten) in Randlage des Gebäudes und abseits der Erweiterungsrichtungen	3	Universalität	Anzahl fixer Einbauten mit Randlage / Gesamtzahl fixer Einbauten (%)		x						
52	Lichthauben im Dach (bessere Ausleuchtung tagsüber, Nutzung als Dauerarbeitsplatz)	3	Universalität	Anteil der Fläche, die mit Tageslicht beleuchtet ist (%)		x						

FGF	Produktionsmittel und Arbeitsplätze				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Mobilität der Produktionsmittel und Arbeitsplätze**	2										
53	Maschinen auf Rädern	3	Mobilität	Anteil der Maschinen auf Rädern / Gesamtzahl Maschinen (%)	x							
54	Betonanker anstatt Maschinenfundament (lösbare Fundamente)	3	Mobilität Universalität	Anteil der Maschinen mit Betonanker/ Gesamtzahl Maschinen (%)	x							
55	Anlagen mit Fähigkeit zum Selbsttest (Diagnose und Vorprüfungen zur Beschleunigung und Vereinfachung der Inbetriebnahme)	3	Mobilität	durchschnittliche Zeit für Inbetriebnahme der Anlagen			x					
56	Positionieren von schweren, standortfixen Maschinen in Randlage des Gebäudes und abseits der Erweiterungsrichtungen	3	Mobilität Skalierbarkeit	Anzahl standortfixer Anlagen in Randlage / Gesamtzahl standortfixer Anlagen	x	x		x				
57	keine standortfixen Strukturen am Bandende (bei Linienfertigung)	3	Mobilität Skalierbarkeit	Anteil der Bandenden mit flexiblen Strukturen / Gesamtzahl Bandenden (%)	x							
58	Einsatz von Betriebsmitteln mit der Möglichkeit zum Verzicht auf Fundamente (keine maschinenspezifische Bodengestaltung)	3	Mobilität	Anzahl Maschinen mit Fundament / Gesamtanzahl Maschinen				x				
59	Kranabdeckung möglichst groß	3	Mobilität Universalität	Anteil abgedeckter Flächen der Gesamtfläche (%)	x			x				
VBF_2	**Standardisierte, modulare Produktionsmittel und Arbeitsplätze**	2										
60	Maschinen mit autarken, austauschbaren mechatronischen Modulen	3	Modularität Standardisierung	Anzahl Bearbeitungszentren mit aut. u. aust. mech. Modulen / Gesamtzahl Maschinen					x	x		
61	selbstadaptierende Steuerungssysteme bei Betriebsmitteln (selbstständige Anpassung an geänderte Maschinenkonfiguration durch Hinzufügen, Löschen und Umparametrieren von Softwarekomponenten im Steuerungssystem)	3	Modularität Standardisierung	Anzahl Betriebsmittel mit selbstadaptierenden Steuerungssystemen / Gesamtzahl Betriebsmittel (%)					x	x		
62	Einsatz offener, herstellerunabhängiger Steuersysteme (ermöglicht Plug and Produce)	3	Standardisierung	ja / zum Teil / nein								
63	hersteller- und versionskompatible Standards und Formate bei Steuerungssoftware und Daten	3	Kompatibilität Standardisierung	ja / zum Teil / nein						x		
64	hersteller- und versionskompatible Standards bei Belegungen (z. B. Steckplätze Steuerungstechnik, SPS etc.)	3	Kompatibilität Standardisierung	ja / zum Teil / nein						x		
65	hersteller- und versionskompatible Standards bei Werkstückspannmitteln und deren Baugrößen	3	Kompatibilität Standardisierung	ja / zum Teil / nein						x		
66	modulare Arbeitsplatzbausätze verwenden (z. B. Boschprofile etc.)	3	Modularität Standardisierung	Anteil Arbeitsplätze aus modularen Bausätzen / Gesamtzahl Arbeitsplätze	x							
67	standardisierte und dokumentierte Rüstvorgänge	3	Standardisierung Universalität	durchschnittliche Rüstzeit / Instandhaltungszeit der Maschinen			x					
VBF_2	**Universelle Produktionsmittel und Arbeitsplätze**	2										
68	„Plug & Produce“ an Maschinen und Anlagen (durch selbstadaptierende Steuerungssysteme und autonome, standardisierte Funktionseinheiten)	3	Kompatibilität Universalität	Anteil Maschinen mit „P & P“ / Gesamtzahl Maschinen (%)						x		
69	Unempfindlichkeit der Produktionsmittel gegenüber Emissionen anderer Maschinen (Vibration, Lärm, Temperatur) durch konstruktive Maßnahmen	3	Kompatibilität Universalität	Anzahl an Maschinen, die durch Emissionen anderer Maschinen beeinflusst werden / Gesamtzahl Maschinen (%)			x					

70	ergonomisch anpassbare Arbeitsplätze (z. B. höhenverstellbare Arbeitstische)	3	Kompatibilität Universalität	Anteil der ergonomisch anpassbaren AP / Gesamtzahl AP (%)			x					
71	Anlage ist so konstruiert, dass sie andere Mittel nicht durch Emission belastet (Lärm, Vibrationen, Hitze etc.)	3	Kompatibilität Universalität	Anzahl an Maschinen, die durch Emissionen andere Maschinen beeinflussen / Gesamtzahl Maschinen (%)			x					
72	Nicht-werkstückformprägende, frei programmierbare Werkzeugtechnologien	3	Kompatibilität Universalität	1- Anteil der werkstückformprägenden Werkzeugtechnologien / Gesamtzahl WT (%)				x				
VBF_2	**Skalierbare Gestaltung der Produktionsmittel und Arbeitsplätze**	**2**										
73	ausreichend, ggf. überdimensionierte Betriebsmittel bezüglich Teilegröße, Teilgewicht und Bearbeitungsleistung	3	Skalierbarkeit Universalität	Zahl der überdimensionierten BM / Gesamtzahl der BM (%)				x				
74	Überkapazitäten durch Ausweichmaschinen (ggf. zusätzliches Betriebsmittel)	3	Skalierbarkeit	Anteil ungenutzter Maschinen / Gesamtzahl Maschinen (%)	x							
75	Arbeitsplätze, an denen unterschiedlich viele Mitarbeiter arbeiten können	3	Kompatibilität Skalierbarkeit	durchschnittliche Anzahl an MA pro AP	x							
76	erweiterbare Flächen für Betriebsmittel vorsehen (ringsherum etwas mehr Platz als nötig einplanen)	3	Skalierbarkeit	Durchschnittliche Überdimensionierung der Maschinenflächen (%)	x							
77	Einsatz einfacher Maschinen für spezifische, hoch arbeitsteilige Arbeitsgänge, sodass bei Stückzahlschwankungen Maschinen flexibel hinzugefügt oder wieder abgebaut werden können	3	Skalierbarkeit	Anzahl der Maschinen pro Arbeitsgang						x		
78	Nutzung neuer Eigentumsmodelle (Mietparks oder Sharing-Konzepte)	3	Skalierbarkeit	Anteil gemieteter Maschinen / Gesamtzahl Maschinen (%)								x

FGF	Transporttechnik, Lager und Flüsse				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Universell veränderbare und kompatible (Material-) Flussbeziehungen**	**2**										
79	Einsatz dezentral gesteuerter Transportmittel (z. B. Stapler, Routenzug) anstelle zentral gesteuerter Systeme (z. B. FTS, EHB)	3	Universalität Mobilität	Anteil der dezentral gesteuerten TE (%)	x							
80	Einsatz von Unstetigförderern anstelle von Stetigförderern (schneller lösbare Verkettung des Flusses zwischen den Produktionsmitteln)	3	Kompatibilität Mobilität Universalität	Anteil der Unstetigförderer (%)				x				
81	Transporteinheiten mit Ein- und Auslagerfunktionen	3	Kompatibilität Universalität	Anteil der TE mit Ein-und Auslagerfunktion / Gesamtzahl TE								x
82	Einsatz von Transportmitteln, die innerhalb und außerhalb der Fabrikhalle nutzbar sind (z. B. Stapler)	3	Mobilität Universalität	Anteil der Transportmittel, die außerhalb verwendbar sind / Gesamtzahl der Transportmittel (%)			x					
83	einfache dezentrale Regelkreise (z. B. KANBAN) zur Steuerung der Logistik anstelle einer komplexen Gesamtsteuerung	3	Modularität Universalität	Anzahl der Regelkreise in der Logistik			x					
84	niedriger Automatisierungsgrad der Transporttechnik	3	Kompatibilität Universalität	Anteil der automatisierten Transporttechnik (%)	x		x					
VBF_2	**Segmentspezifische Logistikmodule mit standardisierten Bausteinen**	**2**										
85	Standardisierung der Transportmittel und Behältersysteme (z. B. Standard-Gitterbox) bzgl. · Gewicht, Nenntragfähigkeit · Kapazität · Dimensionen / Volumen	3	Standardisierung Modularität	Anteil der standardisierten Transportmittel bzw. Behältersysteme (%)			x	x				
86	Standardisierung der Lagerplätze bzgl. · Gewicht, Nenntragfähigkeit · Kapazität · Dimensionen / Volumen	3	Standardisierung Modularität	Anteil der standardisierten Lagerplätze (%)			x	x				
87	modulare Transporttechnik mit standardisierten mechatronischen Schnittstellen	3	Modularität Standardisierung	Anteil der standardisierten mechatronischen Schnittstellen (%)								x
VBF_2	**Skalierbare Transporttechnik und Lager**	**2**										
88	robuste (ggf. Über-) Dimensionierung der Transportmittel und Behältersysteme bzgl. · Gewicht, Nenntragfähigkeit · Kapazität · Dimensionen / Volumen	3	Skalierbarkeit	Überdimensionierung der Transportmittel bzw. Behältersysteme (%)			x	x				
89	robuste (ggf. Über-) Dimensionierung der Lager (z. B. durch Lagerreserve, ungenutzte Regale)	3	Skalierbarkeit	Überdimensionierung der Lager (%)			x	x				
90	Einsatz von Regalen, die in der Höhe erweiterbar sind	3	Skalierbarkeit	Anteil der höhenerweiterbaren Regale (%)			x					

VBF_2	**Mobilität der Transporttechnik und Logistikkomponenten**	**2**										
91	Einsatz ortsungebundener Fördertechnik (z. B. Stapler, Routenzug) anstelle ortsfixer Systeme (z. B. Power and Free) mit Boden- oder Deckenfixierung	**3**	Mobilität Kompatibilität Universalität	Zeit für den Umbau der Fördertechnik pro Meter (h)	x							
92	Portale mit Gehängen auf Rollen anstelle z. B. einer Elektrohängebahn (Mobilität der Gehänge, keine fixe Kopplung)	**3**	Mobilität	Anteil Gehänge auf Rollen an gesamter Fördertechnik (%)	x			x				
93	Lückenloses Ver- und Entsorgungsnetz	**3**	Mobilität	Anzahl unversorgter AP / Gesamtzahl der AP (%)				x				
94	Aufwandsarm montier- und demontierbare Transporteinheiten	**3**	Mobilität	durchschnittlicher Aufwand pro Änderungsvorgang an der Transporttechnik (in EUR)		x		x				
95	Aufwandsarm montier- und demontierbare Lagereinrichtungen	**3**	Mobilität	durchschnittlicher Aufwand pro Änderungsvorgang an der Lagertechnik (in EUR)		x		x				
96	bewegliche Puffer auf Rollen ohne fixe Verankerung im Boden	**3**	Mobilität	Anteil der Puffer auf Rollen (%)				x				

FGF	Organisation und MA				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Kompatibilität und Vernetzung des technischen und sozialen Systems**	**2**										
97	dezentrale Entscheidungsstrukturen, flache Hierarchien	**3**	Kompatibilität Vernetzungs-fähigkeit	Hierarchieebenen / Anzahl Mitarbeiter	x							
98	Standardisierte Schnittstellen der IuK-Systeme unterschiedlicher Bereiche und Anlagen	**3**	Kompatibilität Vernetzungs-fähigkeit	ja / zum Teil / nein				x				
99	Hoher Anteil des Personals in den direkten Bereichen, organisiert in autonomen, eigenverantwortlichen Gruppen geringer Größe	**3**	Modularität Vernetzungs-fähigkeit	Anteil des Personals, das in autonomen Gruppen organisiert ist (%)			x					
100	viele unterschiedliche IuK-Medien (Telefon, Mail, direkte Gespräche, Chat-Programme, internes Facebook etc.)	**3**	Mobilität Vernetzungs-fähigkeit	Anzahl genutzte IuK-Medien				x				
101	Kommunikation als Optimierungskriterium (schnelle und einfache Kommunikation)	**3**	Mobilität Vernetzungs-fähigkeit	ja / zum Teil / nein	x							
102	elastische Verkettung der Produktionsmittel durch One Piece Flow (oft in Verbindung mit Fertigungsinseln)	3	Vernetzungs-fähigkeit	Anteil des Produktionsprozesses im One-Piece-Flow in (%)			x	x				
VBF_2	**soziotechnische Skalierbarkeit durch Organisation und Mitarbeiter**	**2**										
103	vertraglich gesicherte Vielfältigkeit der Anwendung von Arbeits- und Entgeltmodellen (z. B. Schichtmodelle, Gleitzeitkonten)	**3**	Skalierbarkeit	ja / zum Teil / nein				x				
104	hoher Anteil des Personals mit befristeten Verträgen (Zeit- / Leiharbeits / Werkverträge: „Atmungsfähigkeit“ über die Mitarbeiter)	**3**	Skalierbarkeit	Anteil des Personals mit Zeit-/Leiharbeits oder Werksverträgen)	x							
105	Personelle Überkapazitäten durch zusätzliche Mitarbeiter vorhalten	**3**	Skalierbarkeit	Personelle Überkapazitäten (%)								
VBF_2	**Universalität durch Organisation und Mitarbeiter**	**2**										
106	manuelle statt hochautomatisierter Montage und Fertigung	**3**	Universalität Skalierbarkeit	Anteil der manuellen Fertigung / Montage (%)	x							
107	spätestmögliche Variantenbildung im Produktionsprozess, Kundenentkopplungspunkt spät im Prozess (schnellere & einfachere Integration neuer Produkte in die Produktion)	3	Standardisierung Universalität	Anteil der Werkschöpfung vor dem KEP (%)			x					
108	Arbeitspläne standardisiert, dokumentiert und zentral verfügbar, Änderungen können schnell und aufwandsarm umgesetzt werden	**3**	Kompatibilität Universalität	ja / zum Teil / nein			x					
109	flexible Arbeitsteilung und Springereinsatz, Job-Rotation	**3**	Universalität	Anteil der Produktionsbereiche, in denen flexible Arbeitsteilung, Springereinsatz bzw. Job-Rotation durchgeführt werden (%)	x							
110	Mitarbeiter mit hohem Qualifikationsniveau	**3**	Universalität	Durchschnittliches Qualifikationsniveau der Mitarbeiter								

FGF	Planungsprozess				I	J	HG	HE	W	NY	F	SW
VBF_2	**Universalität und Kompatibilität im Planungsprozess**	**2**										
111	flexible Commitments zu Technologien, um während des Planungsprozesses wechseln zu können	**3**	Kompatibilität Universalität	ja / zum Teil / nein			x					
112	digitale Transparenz von Planungsunterlagen und Maschinendaten (z. B. durch Cloud-Systeme, transparente Rechtegestaltung)	**3**	Kompatibilität Universalität	ja / zum Teil / nein						x		
113	Digitalisierung nur, wenn Nutzen klar ersichtlich (VR, AR, 3-D-Layout)	**3**	Kompatibilität Universalität	ja / zum Teil / nein	x							
114	Kenntnis über Abhängigkeiten im Planungsprozess (zu Daten, Planungsschritten etc. z. B. durch Tools des Komplexitätsmanagements)	**3**	Kompatibilität	ja / zum Teil / nein	x							
VBF_2	**Skalierbarkeit des Planungsprozesses**	**2**										
115	Überdimensionierung der Planungskapazität (z. B. durch temporäre Task-Force-Teams, zusätzliche Mitarbeiter, externe Berater etc.)	**3**	Skalierbarkeit	Überdimensionierung der Planungskapazität (%)	x							
116	Puffer im Projektplan vorsehen	**3**	Skalierbarkeit	Pufferzeit / Gesamtdauer des Projekts (%)	x							
117	Baustufen bereits in der Planung berücksichtigen	**3**	Modularität Skalierbarkeit	Anzahl der Planungsstufen	x							
VBF_2	**Standardisierung des Planungsprozesses**	**2**										
118	geplante, dokumentierte Routinen bei plötzlichen Prämissen- und Datenänderungen	**3**	Standardisierung	ja / zum Teil / nein	x							
119	standardisierte Software und Datenformate	**3**	Kompatibilität Standardisierung	ja / zum Teil / nein						x		
120	durchgängige Verwendung von Maschinen- und Prozessdaten durch Cloud-Anwendungen oder Shared Work (erleichtert die Durchführung von Datenänderungen)	**3**	Standardisierung	Anzahl der Formattransformationen im Prozess						x		
121	mögliche konkrete Prämissenänderungen und Datenunschärfen vordenken	**3**	Standardisierung	Anzahl der Planungsszenarien	x							
122	Funktionen und Prozesse analysieren, systematisieren und standardisieren, erst dann automatisieren (z. B. in Software, ERP-Systemen, Datenbanken)	**3**	Standardisierung Universalität	Anteile der Planungsbereiche, die nach ISO 9000/9001-dokumentierten Prozessen arbeiten (%)								x

Quellen:
- I: Experteninterviews
- J: JANORSCHKE & PRITZEL (2009)
- HG: HEGER (2007, S. 67–101)
- HE: HERNÁNDEZ MORALES (2003, S. 54–56)
- W: WIENDAHL ET AL. (2009, S. 128–134)
- NY: NYHUIS (2010, S. 26–28)
- F: FINK (2003)
- SW: SCHENK ET AL. (2014A, S. 40–43)

Legende:
- VBF_1: Primärbefähiger
- VBF_2: Sekundärbefähiger
- VBF_3: Tertiärbefähiger
- FGF: Fabrikgestaltungsfeld
- Ordn.: Ordnung
- TGA: Technische Gebäudeausstattung
- TE: Transporteinheit

FTS: Fahrerloses Transportsystem

EHB: Elektrohängebahn

KEP: Kundenentkopplungspunkt

AP: Arbeitsplatz

P&P: Plug & Produce

WT: Werkzeugtechnologie

IuK: Informations- und Kommunikationstechnik

IT: Informationstechnik

L. Übersicht Software zur Unterstützung der Unschärfefortpflanzungsanalyse

Nr.	Fortpflanzungsmechanismus	Softwaretools
1	Gauß'sches Fehlerfortpflanzungsgesetz	*aranea** + Ableitungsrechner: https://www.ableitungsrechner.net/
2	Monte-Carlo Simulation	Oracle Crystal Ball®: Add-In für Microsoft Excel®
3	Fuzzy Inferenz	MATLAB®-Tool* unter Verwendung der MATLAB® Fuzzy Logic Toolbox

* Eigenentwicklung

M. Ergebnisse der Regressionsanalysen

Abhängige Variable: Anzahl Takte

Modellzusammenfassung

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,982[a]	,965	,945	87,882

a. Einflußvariablen : (Konstante), Anzahl Derivate Aktuell, Fertigungstiefe, Elektrifizierungskennzahl, Design hourly output [u/h]

Koeffizienten

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
		RegressionskoeffizientB	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	110,882	147,711		,751	,477
	Elektrifizierungskennzahl	-173,197	61,646	-,250	-2,810	,026
	Design hourly output [u/h]	12,673	2,358	,620	5,375	,001
	Fertigungstiefe	450,638	140,411	,255	3,209	,015
	Anzahl Derivate Aktuell	17,291	13,381	,125	1,292	,237

Abhängige Variable: Montagefläche

Modellzusammenfassung

Modell	R	R-Quadrat	Korrigiertes R-Quadrat	Standardfehler des Schätzers
1	,864[a]	,747	,652	28827,545

a. Einflußvariablen : (Konstante), Max. Fahrzeugklasse, Takte Total, Total Automatisierungsgrad

Koeffizienten

Modell		Nicht standardisierte Koeffizienten		Standardisierte Koeffizienten	T	Sig.
		RegressionskoeffizientB	Standardfehler	Beta		
1	(Konstante)	-7957,487	42057,538		-,189	,855
	Takte Total	91,880	28,978	,707	3,171	,013
	Total Automatisierungsgrad	417974,218	384849,838	,253	1,086	,309
	Max. Fahrzeugklasse	2431,249	10373,842	,048	,234	,821

Abb. 7.2: Ergebnisse der Regressionsanalyse zur Berechnung abhängiger Planungsparameter.

N. Wirkbeziehungen der im Anwendungsfall relevanten Tertiärbefähiger

Tabelle 7.4: Darstellung der Wirkbeziehungen der im Anwendungsfall relevanten Tertiärbefähiger in einer DSM (Auszug).

Veränderungsbefähiger \ Veränderungsbefähiger	ausreichend dimensionierte Wege	gesamte Fläche von allen Transportmitteln befahrbar	Logistik- zu Montagefläche wandelbar und umgekehrt	großes Stützenrastermaß (Säulenabstand)	kompakte räumliche Anordnung gleichartiger Funktionseinheiten	Frei- bzw. Reserveflächen ("Flächenpuffer") innerhalb der Fabrikhal	Wachstumsflächen in verschiedene Richtungen (für Produktionserw	Bereiche haben nur eine fixe Kante, erweiterbar in andere Richtung	Verkehrserschließung der Gebäude von mehreren Seiten gewährlei	freie Bauflächen außerhalb des Fabrikgebäudes	Belieferung / Versorgung der Anlagen von mehreren Seiten möglich	Skelettbauweise der Wandbauweise vorziehen	Sprinkler statt Brandwände zur Reduktion der Innenwände	Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk	kostengünstig versetzbare, standardisierte Systemwände innen	überdimensionierte Tragwerksbelastbarkeit	Luftheizung anstelle einer Bodenheizung	ausreichend dimensionierte Gebäudehöhe	kostengünstig versetzbare / rückbaubare Außenwände	einfache Technik zum Verbinden der Träger ohne Spezialwerkzeug	überdimensionierte Medienleitungen/-kanäle	Integration der Belüftungsanlagen in Dach/Deckentragwerk	Medienleitungen in Wannen oder offenen Trassen, nicht unter Putz	keine Gruben, keine Wannen im Boden	ebener Boden, wenig Ecken	Auslegung der Klimatisierung für unterschiedliche Anwendungsfälle	Auslegung der Heizung für unterschiedliche Anwendungsfälle	eingeschossige Gebäude	feste Einbauten in Randlage des Gebäudes	...	**Aktivsumme**
ausreichend dimensionierte Wege						-1					2																				**1**
gesamte Fläche von allen Transportmitteln befahrbar			2								1																				**3**
Logistik- zu Montagefläche wandelbar und umgekehrt						2																									**2**
großes Stützenrastermaß (Säulenabstand)	2	1	2					2						-1		-2															**4**
kompakte räumliche Anordnung gleichartiger Funktionseinheiten																															**0**
Frei- bzw. Reserveflächen ("Flächenpuffer") innerhalb der Fabrikhalle								2		-2	3																			1	**4**
Wachstumsflächen in verschiedene Richtungen (für Produktionserweiterung)					2					3																					**5**
Bereiche haben nur eine fixe Kante, erweiterbar in andere Richtungen							3				1																				**4**
Verkehrserschließung der Gebäude von mehreren Seiten gewährleisten	1		1							1	1																				**4**
freie Bauflächen außerhalb des Fabrikgebäudes							3		2																						**5**
Belieferung / Versorgung der Anlagen von mehreren Seiten möglich			2			1																									**3**
Skelettbauweise der Wandbauweise vorziehen									1				3	2	3				3	2											**14**
Sprinkler statt Brandwände zur Reduktion der Innenwände				1	1			3			1				3																**9**
Medienversorgung über Dach-/Deckentragwerk												2														1					**3**
kostengünstig versetzbare, standardisierte Systemwände innen							1					1																		1	**3**
überdimensionierte Tragwerksbelastbarkeit													1	2	1				-1		2	3									**8**
Luftheizung anstelle einer Bodenheizung		1																						1	2		2				**6**
ausreichend dimensionierte Gebäudehöhe										1	1			1								1									**4**
kostengünstig versetzbare / rückbaubare Außenwände										2																					**2**
einfache Technik zum Verbinden der Träger ohne Spezialwerkzeug															2	2			3												**7**
überdimensionierte Medienleitungen/-kanäle			2																												**2**
Integration der Belüftungsanlagen in Dach/Deckentragwerk		2												-1			1														**2**
Medienleitungen in Wannen oder offenen Trassen, nicht unter Putz			3											2							1										**6**
keine Gruben, keine Wannen im Boden		3	2				2	1																	2					3	**13**
ebener Boden, wenig Ecken		2	1					1			1																			1	**6**
Auslegung der Klimatisierung für unterschiedliche Anwendungsfälle			2																												**2**
Auslegung der Heizung für unterschiedliche Anwendungsfälle			2																												**2**
eingeschossige Gebäude		3		1						-2							1	2	1												**6**
feste Einbauten in Randlage des Gebäudes					1		-2	2																						2	**3**
...			1												1									2							**4**
Passivsumme	**3**	**12**	**20**	**2**	**4**	**2**	**7**	**11**	**3**	**3**	**11**	**3**	**4**	**5**	**10**	**0**	**2**	**2**	**6**	**2**	**3**	**4**	**0**	**3**	**5**	**0**	**2**	**0**	**0**	**8**	

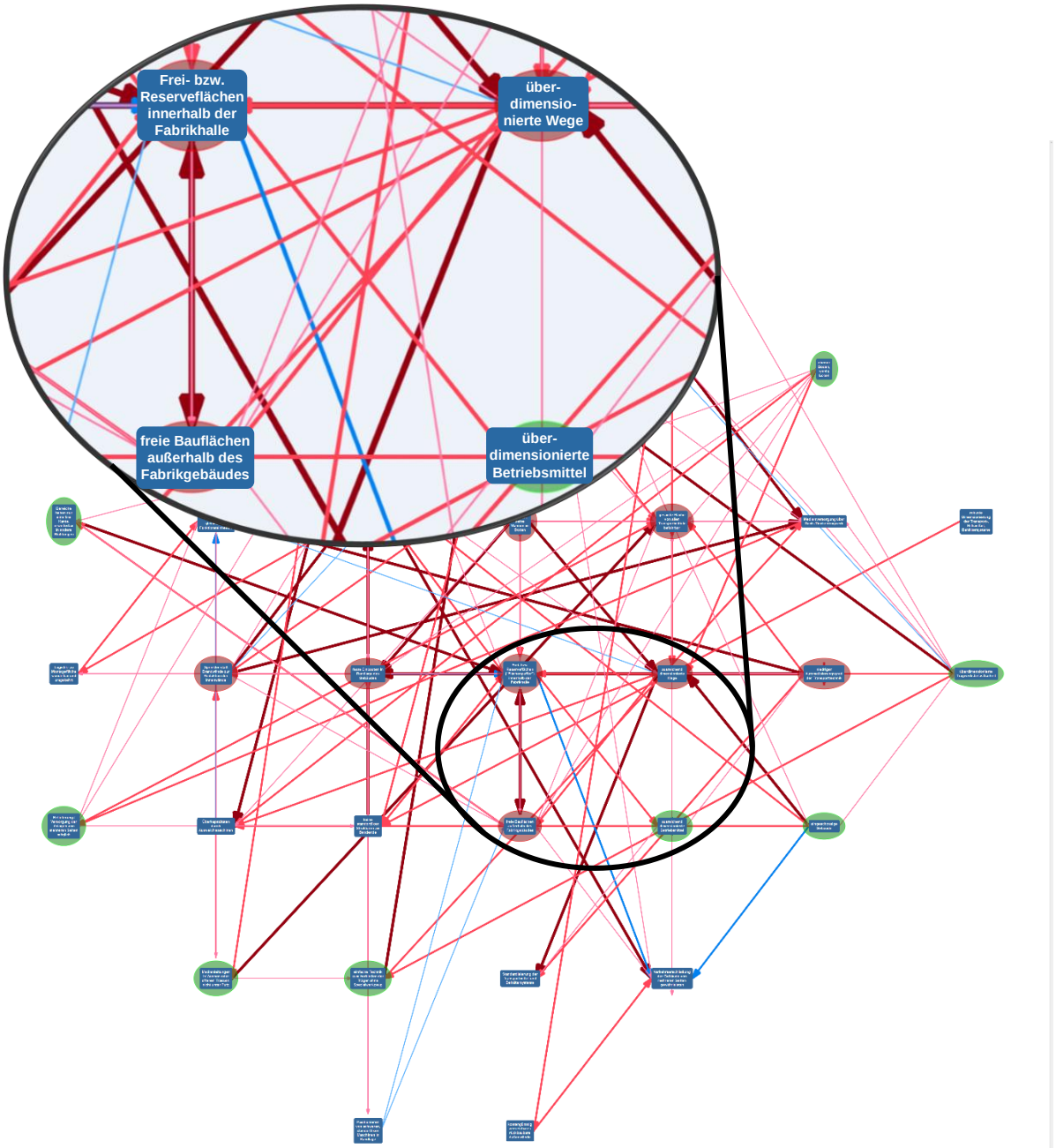


Abb. 7.3: Visualisierung der Wirkbeziehungen zwischen den Tertiärbefähigern mithilfe von *cmt*.

Literaturverzeichnis

ABELE ET AL. 2006
Abele, E.; Elzenheimer, J.; Liebeck, T.; Meyer, T.: Globalization and Decentralization of Manufacturing. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 3–13. ISBN: 978-3-540-29391-0.

ADAMEK 2016
Adamek, T.: Statistik für Anwender. Berlin, Heidelberg: Springer 2016. ISBN: 978-3-662-44147-3.

AGGTELEKY 1987
Aggteleky, B.: Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsorganisation. 2. Aufl. München [u. a.]: Hanser 1987. ISBN: 9783446148604. (Fabrikplanung 1).

AYYUB 2001
Ayyub, B. M.: Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks. London & New York: CRC Press 2001. ISBN: 978-1-420-04090-6.

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.

BAKIR & BYRNE 1994
Bakir, M. A.; Byrne, M. D.: An application of the multi-stage Monte Carlo optimization algorithm to aggregate production planning. International Journal of Production Economics 35 (1994) 1–3, S. 207–213.

BAYERISCHE INGENIEURKAMMER-BAU 2015
Bayerische Ingenieurkammer-Bau: Ausgewählte Stundensätze zum Vergleich.

<http://www.bayika.de/de/service/publikationen/pdf/bayika_stundensaetze_ingenieurbuero.pdf> - 14.01.2018.

BENKAMOUN 2016
Benkamoun, N.: Systemic design methodology for Changeable Manufacturing Systems. Diss. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand (2016). <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01420120/document> – 23.10.2017.

BERGHOLZ 2006
Bergholz, M. A.: Objektorientierte Fabrikplanung. Diss. RWTH Aachen (2005): Shaker 2006. ISBN: 3832257705. (Berichte aus der Produktionstechnik 31).

BEWERSDORFF 2003
Bewersdorff, J.: Glück, Logik und Bluff. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2003. ISBN: 978-3-528-26997-5.

BMW GROUP 2016
BMW Group: BMW Group feiert Spatenstich für neues Werk in Mexiko. Pressemeldung. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0261073DE/bmw-group-feiert-spatenstich-fuer-neues-werk-in-mexiko?language=de> – 10.12.2017.

BMW GROUP 2018
BMW Group: Geschäftsbericht 2017. <https://www.bmwgroup.com/content/dam/bmw-group-websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2018/Gesch%C3%A4ftsbericht/BMW-GB17_de_Finanzbericht_ONLINE.pdf> – 22.04.2018.

BOGNER ET AL. 2014
Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W.: Interviews mit Experten. Eine praxisorientierte Einführung: Springer 2014. ISBN: 353119416X. (Qualitative Sozialforschung).

BORST 1997
Borst, P.: Construction of engineering ontologies for knowledge sharing and reuse. Diss. University of Twente (1997). Enschede: CTIT, Centre for Telematics and Information Technology 1997. ISBN: 9789036509886. (CTIT Ph. D-thesis series 14/1997).

BOTHE 1995
Bothe, H.-H.: Fuzzy Logic. Berlin, Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-56967-1.

BRINKMANN 1989

Brinkmann, M.: Dynamische Groblayout-Planung auf der Basis des Durchlaufdiagramms. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag 1989. ISBN: 9783181484029. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 184).

BRUNNER 1994

Brunner, J.: Interaktive Fuzzy Optimierung. Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems. Diss. Heidelberg: Physica 1994. ISBN: 9783790807455. (Schriftenreihe Handeln und Entscheiden in komplexen ökonomischen Situationen 11).

CHAN & MALMBORG 2010

Chan, W. K.; Malmborg, C. J.: A Monte Carlo simulation based heuristic procedure for solving dynamic line layout problems for facilities using conventional material handling devices. International Journal of Production Research 48 (2010) 10, S. 2937–2956.

CIROTH 2001

Ciroth, A.: Fehlerrechnung in Ökobilanzen. Effiziente Kombination von Näherungsverfahren und Simulation. Diss. Technische Universität Berlin (2001). Berlin: VDM-Verlag 2001. ISBN: 3836475138.

CISEK 2005

Cisek, R.: Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen. Diss. Technische Universtität München (2004). München: Utz 2005. ISBN: 3-8316-0475-4. (Forschungsberichte iwb 191).

CISEK ET AL. 2002

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

CLAUSSEN 2012

Claussen, P.: Die Fabrik als soziales System. Wandlungsfähigkeit durch systemische Fabrikplanung und Organisationsentwicklung – ein Beispiel aus der Automobilindustrie. Wiesbaden: Springer 2012. ISBN: 3834943762.

COLUBI & GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ 2015

Colubi, A.; González-Rodríguez, G.: Fuzziness in data analysis. Towards accuracy and robustness. Fuzzy Sets and Systems 281 (2015), S. 260–271.

CONSTANTINESCU & WESTKÄMPER 2010

Constantinescu, C.; Westkämper, E.: A Reference Model for Factory Engineering and Design. In: Kacprzyk, J. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 6th CIRP-Sponsored International Conference on Digital Enterprise Technology. Berlin, Heidelberg: Springer 2010, S. 1551–1564. ISBN: 978-3-642-10429-9. (Advances in Intelligent and Soft Computing).

COOPER 2010

Cooper, R. G.: Top oder Flop in der Produktentwicklung. Erfolgsstrategien: von der Idee zum Launch. 2. Aufl. Weinheim: Wiley 2010. ISBN: 3527505121.

CREUTZNACHER ET AL. 2016

Creutznacher, T.; Berger, U.; Lepratti, R.; Lamparter, S.: The Transformable Factory. Adapting Automotive Production Capacities. Procedia CIRP 41 (2016), S. 171–176.

CZICHOS ET AL. 2011

Czichos, H.; Saito, T.; Smith, L.: Springer Handbook of Metrology and Testing. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-16640-2.

DAMODARAN 2008

Damodaran, A.: Strategic risk taking. A framework for risk management. Upper Saddle River, NJ: Wharton School Publishing 2008. ISBN: 978-0-13-199048-7.

DIJKMAN ET AL. 1983

Dijkman, J.; van Haeringen, H.; Lange, S. de: Fuzzy numbers. Journal of Mathematical Analysis and Applications 92 (1983) 2, S. 301–341.

DIN 1319-4

DIN 1319-4: Grundlagen der Messtechnik Teil 4: Auswertung von Messungen und Meßunsicherheit. Berlin: Beuth 1999.

DIN 44300

DIN 44300: Informationsverarbeitung Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 1972.

DÖRRER 2000

Dörrer, T.: Wissensbasierte Evaluierung zukünftiger Produktionsstrategien. Diss. Technische Universität Clausthal (1999). Aachen: Shaker 2000. ISBN: 9783826572678. (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation 1/2000).

DRABOW & WOELK 2004
Drabow, G.; Woelk, P.-O.: Wandlungsfähige Fabrik der Zukunft. Modulare Struktur- und Steuerungskonzepte. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 3, S. 90–94.

DUBOIS & PRADE 2000
Dubois, D.; Prade, H. (Hrsg.): Fundamentals of Fuzzy Sets. Boston, MA: Springer 2000. ISBN: 9781461369943. (The Handbooks of Fuzzy Sets Series 7).

DUBOIS ET AL. 1993
Dubois, D.; Prade, H.; Sandri, S.: On Possibility/Probability Transformations. In: Lowen, R. et al. (Hrsg.): Fuzzy logic. State of the art. Dordrecht: Springer Science 1993, S. 103–112. ISBN: 978-94-010-4890-3.

DÜMBGEN 2016
Dümbgen, L.: Einführung in die Statistik. Basel: Springer 2016. ISBN: 978-3-0348-0003-7.

EHRLENSPIEL ET AL. 2005
Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.: Kostengünstig entwickeln und konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 5. Aufl. Berlin [u. a.]: Springer 2005. ISBN: 3540251650.

EIGNER 2010
Eigner, M.: Future PLM – Trends aus Forschung und Praxis. <http://www.a-ras.com/blogs/ace-2010-germany/12-Prof.Dr.-Martin-Eigner.pdf> - 02.01.2018.

EIGNER ET AL. 2014
Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R.: Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung. Berlin: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-662-43815-2.

ELLIS 2016
Ellis, G.: Project management in product development. Leadership skills and management techniques to deliver great products. Amsterdam: Elsevier Ltd 2016. ISBN: 978-0-12-802322-8.

ELMARAGHY 2009
ElMaraghy, H. A.: Changeable and reconfigurable manufacturing systems. New York, London: Springer 2009. ISBN: 1848820666. (Springer series in advanced manufacturing).

ENGHARDT 1987

Enghardt, W.: Groblayout-Entwicklung und -Bewertung als Baustein der rechnerintegrierten Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (1986). Düsseldorf: VDI-Verlag 1987. ISBN: 9783181444023. (Fortschritt-Berichte VDI 144).

EPPINGER & BROWNING 2012

Eppinger, S. D.; Browning, T. R.: Design structure matrix methods and applications. Cambridge, London: MIT Press 2012. ISBN: 978-0-262-01752-7. (Engineering systems).

ERLACH & FOITH-FÖRSTER 2014

Erlach, K.; Foith-Förster, P.: Dimensionierung wandlungsfähiger Fabriken. Planungsprozess zur Festlegung einer idealen wirtschaftlichen Werksgröße. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 3, S. 125.

EUROPÄISCHE KOMMISSION 2003

Europäische Kommission: Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. Amtsblatt der Europäischen Union L124/36. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003H0361&from=DE> – 12.12.2017.

FAHRMEIR ET AL. 2007

Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G.: Statistik. Der Weg zur Datenanalyse. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 354069739X.

FELIX 1998

Felix, H.: Unternehmens- und Fabrikplanung. Planungsprozesse, Leistungen und Beziehungen. München: Hanser 1998. ISBN: 9783446192522.

FIKSEL 2006

Fiksel, J.: Sustainability and Resilience. Toward a Systems Approach. Sustainability: Science, Practice, & Policy 2 (2006) 2, S. 14–21.

FINK 2003

Fink, M.: Flexibilität in der Fabrikplanung: Agile und wandlungsfähige Fabrikstrukturen. In: Bundesvereinigung Logistik e. V. (Hrsg.): Grenzen überwinden – Wandel gestalten. Hamburg: Deutscher Verkehrsverlag 2003, S. 415–418. ISBN: 978-3871542916.

FORTE 2002

Forte, M.: Unschärfe in Geschäftsprozessen. Diss. Universität Hannover. Berlin: Weißensee 2002. ISBN: 978-3934479791.

FRAUNHOFER IWU 2017

Fraunhofer IWU: Referenzfabrik "Green Carbody Technologies". <https://www.greencarbody.de/cgi-bin/click.system?navid=Impressum_1202> – 28.01.2018.

FRICKE & SCHULZ 2005

Fricke, E.; Schulz, A. P.: Design for changeability (DfC). Principles to enable changes in systems throughout their entire lifecycle. Systems Engineering 8 (2005) 4, S. 169.

GEBHARD 2009

Gebhard, M.: Hierarchische Produktionsplanung bei Unsicherheit. Diss. Katholische Universität Eichstätt-Ingolstadt (2009). Wiesbaden: Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1677-8.

GERTSBAKH 2003

Gertsbakh, I.: Measurement Theory for Engineers. Berlin, Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 978-3-642-05509-6.

GORROD 2004

Gorrod, M.: Risk Management Systems. London: Palgrave Macmillan UK 2004. ISBN: 978-1-349-51263-8.

GRABE 2011

Grabe, M.: Grundriss der Generalisierten Gauß'schen Fehlerrechnung. Berlin, Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-17821-4.

GREITEMANN 2016

Greitemann, J.: Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien. Diss. Technische Universität München. München (2016). <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1292557/document.pdf> – 28.12.2017.

GROBELNY 1987

Grobelny, J.: The fuzzy approach to facilities layout problems. Fuzzy Sets and Systems 23 (1987) 2, S. 175–190.

GROSSE-BRÖMER & STRAUBINGER 2017
Grosse-Brömer, M.; Straubinger, M.: Deutschland geht es gut. <https://www.cducsu.de/themen/deutschland-geht-es-gut> – 11.10.2017.

GRÖSSER 2017
Grösser, S.: Gabler Wirtschaftslexikon, online im Internet. Stichwort: Digitaler Zwilling. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/-2045879713/digitaler-zwilling-v1.html> – 13.10.2017.

GRUNDIG 2009
Grundig, C. G.: Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen. 3. Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 3446414118.

GUARINO ET AL. 2009
Guarino, N.; Oberle, D.; Staab, S.: What Is an Ontology? In: Staab, S. et al. (Hrsg.): Handbook on Ontologies. Berlin, Heidelberg: Springer 2009, S. 1‑17. ISBN: 978-3-540-70999-2. (International Handbooks on Information Systems).

GÜNTHER 2005
Günther, U.: Methodik zur Struktur- und Layoutplanung wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. Technische Universität Chemnitz (2005).

GUTENBERG 1965
Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. 8. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer 1965. ISBN: 3662381702. (Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft).

HAMMOND 1978
Hammond, K. R.: Toward increasing competence of thought in public policy formation. In: Hammond, K. R. (Hrsg.): Judgment and decision in public policy formation. Boulder, CO: Westview Press 1978, S. 11–32. (AAAS selected symposium).

HAWER ET AL. 2015
Hawer, S.; Ilmer, P.; Reinhart, G.: Klassifizierung unscharfer Planungsdaten in der Fabrikplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 110 (2015) 6, S. 348–351.

HAWER ET AL. 2016A
Hawer, S.; Braun, H.; Feldhütter, V.: Modelling Production Systems with Methods from Structural Complexity Management: A new Complexity Management Tool. In: Bullinger-

Hoffmann, A. C. et al. (Hrsg.): Tagungsband VPP 2016, Fachtagung VPP – Vernetzt Planen und Produzieren. Chemnitz, 21.10.2016. 2016.

HAWER ET AL. 2016B
Hawer, S.; Braun, N.; Reinhart, G.: Analyzing Interdependencies between Factory Change Enablers Applying Fuzzy Cognitive Maps. Procedia CIRP 52 (2016), S. 151–156.

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

HEGER 2007
Heger, C. L.: Bewertung der Wandlungsfähigkeit von Fabrikobjekten. Diss. Universität Hannover (2007). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum 2007.
ISBN: 9783939026433. (Berichte aus dem IFA 1).

HELFRICH 2016
Helfrich, H.: Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler. Wiesbaden: Springer Fachmedien 2016. ISBN: 978-3-658-07035-9.

HELTON & BURMASTER 1996
Helton, J. C.; Burmaster, D. E.: Guest editorial. Treatment of aleatory and epistemic uncertainty in performance assessments for complex systems. Reliability Engineering & System Safety 54 (1996) 2–3, S. 91–94.

HELTON 1997
Helton, J. C.: Uncertainty and sensitivity analysis in the presence of stochastic and subjective uncertainty. Journal of Statistical Computation and Simulation 57 (1997) 1–4, S. 3–76.

HELTON 2008
Helton, J. C.: Uncertainty and Sensitivity Analysis for Models of Complex Systems.
In: Barth, T. J. et al. (Hrsg.): Computational Methods in Transport: Verification and Validation. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 207–228. ISBN: 978-3-540-77361-0. (Lecture Notes in Computational Science and Engineering 62).

HERNÁNDEZ MORALES 2003
Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Diss. Universität Hannover (2002). Hannover: VDI-Verlag 2003. ISBN: 9783183149162. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft 149).

HILDEBRAND ET AL. 2004

Hildebrand, T.; Günther, U.; Mäding, K.; Müller, E.: Die Fabrik als Produkt: Neue Leitbilder für die Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 7/8, S. 355–362.

HIRSCH ET AL. 2013

Hirsch, B.; Lübkemann, J.; Nyhuis, P.: Synchronisation von Planungsdisziplinen. Steigerung der Ergebnisqualität in Fabrikplanungsprojekten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 11, S. 850–855.

HIRSHLEIFER & RILEY 1992

Hirshleifer, J.; Riley, J. G.: The analytics of uncertainty and information. Cambridge: Cambridge Univ. Press 1992. ISBN: 0521283698. (Cambridge surveys in economic literature).

HO 1989

Ho, C.-J.: Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness. International Journal of Production Research 27 (1989) 7, S. 1115–1135.

HOFFMAN & HAMMONDS 1994

Hoffman, F. O.; Hammonds, J. S.: Propagation of uncertainty in risk assessments: the need to distinguish between uncertainty due to lack of knowledge and uncertainty due to variability. Risk analysis : an official publication of the Society for Risk Analysis 14 (1994) 5, S. 707–712.

HOFMANN 1983

Hofmann, D.: Handbuch Meßtechnik und Qualitätssicherung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1983. ISBN: 978-3-528-08507-0.

HOLLAND ET AL. 2017

Holland, H.; Lackes, R.; Siepermann, M.; Kamps, U.: Gabler Wirtschaftslexikon, online im Internet. Stichwort: Parameter. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/54940/parameter-v10.html> – 13.10.2017.

HÖNERLOH 1997

Hönerloh, A.: Unscharfe Simulation in der Betriebswirtschaft. Modellbildung und Simulation auf der Basis der Fuzzy-Set-Theorie. Diss. Georg-August-Universität Göttingen (1996). Göttingen: Unitext 1997. ISBN: 9783926142566. (Göttinger Wirtschaftsinformatik 21).

IFMA 2009

IFMA: Strategic Facility Planning. A White Paper. <https://www.ifma.org/docs/default-source/knowledge-base/sfp_whitepaper.pdf> – 29.10.2017.

JANORSCHKE & PRITZEL 2009

Janorschke, B.; Pritzel, C.: Wandlungsfähigkeit. In: Schenk, M. et al. (Hrsg.): Industrielle Dienstleistungen und Internationalisierung. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 409–437. ISBN: 978-3-8349-1359-3.

JCGM 2008

JCGM: Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method. <https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf> – 23.10.2017.

JOHNSON & WICHERN 2007

Johnson, R. A.; Wichern, D. W.: Applied multivariate statistical analysis. 6. Aufl. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall 2007. ISBN: 0-13-187715-1.

KAHLERT 1995

Kahlert, J.: Fuzzy Control für Ingenieure. Analyse, Synthese und Optimierung von Fuzzy-Regelungssystemen. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 1995. ISBN: 978-3-322-90485-0.

KAISER 2014

Kaiser, R.: Qualitative Experteninterviews. Konzeptionelle Grundlagen und praktische Durchführung. Wiesbaden: Springer 2014. ISBN: 978-3-658-02478-9. (Elemente der Politik).

KAMKE & KRÄMER 1977

Kamke, D.; Krämer, K.: Physikalische Grundlagen der Maßeinheiten. Mit einem Anhang über Fehlerrechnung. Stuttgart: Teubner 1977. ISBN: 9783519030157. (Teubner Studienbücher: Physik).

KARL ET AL. 2012

Karl, F.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F.: Strategic Planning of Reconfigurations on Manufacturing Resources. Procedia CIRP 3 (2012), S. 608–613.

KARWOWSKI & EVANS 1986
Karwowski, W.; Evans, R.: Fuzzy concepts in production management research: A review. International Journal of Production Research 24 (1986) 1, S. 129–147.

KETTNER ET AL. 1984
Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München, Wien: Hanser 1984. ISBN: 9783446138254.

KIRCHNER ET AL. 2003
Kirchner, S.; Winkler, R.; Westkämper, E.: Unternehmensstudie zur Wandlungsfähigkeit von Unternehmen. Ergebnisse einer Unternehmensbefragung unter 200 deutschen produzierenden Unternehmen. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 4, S. 254–260.

KLEMKE 2014
Klemke, T.: Planung der systematischen Wandlungsfähigkeit von Fabriken. Diss. Universität Hannover (2014). Hannover: TEWISS 2014. ISBN: 3944586506. (Berichte aus dem IFA 1/2014).

KLIR 1987
Klir, G. J.: Where do we stand on measures of uncertainty, ambiguity, fuzziness, and the like? Fuzzy Sets and Systems 24 (1987) 2, S. 141–160.

KLIR 1990
Klir, G. J.: A principle of uncertainty and information invariance. International Journal of General Systems 17 (1990) 2–3, S. 249–275.

KNIGHT 1964
Knight, F. H.: Risk, uncertainty and profit. New York: Sentry Press 1964.
ISBN: 1614276390.

KOCH 2011
Koch, S.: Methodik zur Steigerung der Wandlungsfähigkeit von Fabriken im Maschinen- und Anlagenbau. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Apprimus 2011. ISBN: 978-3-86359-046-8. (Ergebnisse aus der Produktionstechnik Edition Wissenschaft Apprimus 17/2011).

KOCH ET AL. 2013
Koch, J.; Plehn, C.; Reinhart, G.; Zaeh, M. F.: Cycle Management for Continuous Manufacturing Planning. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and

Economic Sustainability, CARV. München, 6.–9.10.2013: Springer 2013, S. 9–12. ISBN: 9783319020532.

KOCH ET AL. 2016
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.

KOHLAS 1972
Kohlas, J.: Monte Carlo Simulation im Operations Research. Berlin, Heidelberg: Springer 1972. ISBN: 978-3-540-05736-9. (63).

KOHLER 2007
Kohler, J.: Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme. Diss. Technische Universtität München. München: Utz 2007. ISBN: 978-3831607532. (Forschungsberichte iwb 210).

KOREN ET AL. 1999
Koren, Y.; Heisel, U.; Jovane, F.; Moriwaki, T.; Pritschow, G.; Ulsoy, G.; van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. CIRP Annals 48 (1999) 2, S. 527–540.

KORNMEIER 2007
Kornmeier, M.: Wissenschaftstheorie und wissenschaftliches Arbeiten. Heidelberg: Physica 2007. ISBN: 978-3-7908-1918-2.

KORVES & KREBS 2008
Korves, B.; Krebs, P.: Bewertung und Planung von Fabriken unter Flexibilitätsgesichtspunkten bei der Siemens AG. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Kolloquium 2008, müko. München, 9.10.2008. München: Utz 2008, S. 57–67. ISBN: 383160844X.

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

KREBS 2012
Krebs, P.: Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten. Diss. Technische Universtität München (2011). München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4156-7. (Forschungsberichte iwb 255).

KREIß & NEUHAUS 2006
Kreiß, J.-P.; Neuhaus, G.: Einführung in die Zeitreihenanalyse. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-33571-4. (Statistik und ihre Anwendungen).

KRÖLL 2007
Kröll, M.: Methode zur Technologiebewertung für eine ergebnisorientierte Produktentwicklung. Diss. Universität Stuttgart (2007). Heimsheim: Jost-Jetter 2007. ISBN: 3-939890-26-X. (IPA-IAO Forschung und Praxis 468).

KRUSE 1986
Kruse, R.: Unschärfe-Repräsentation und Unschärfe-Fortpflanzung in Expertensystemen. Diss. Bonn: Dokumentationszentrum d. Bundeswehr 1986. (Forschungsbericht aus der Wehrtechnik 3).

KRUSE ET AL. 1994
Kruse, R.; Gebhardt, J.; Klawonn, F.: Fuzzy-Systeme. Stuttgart: Teubner 1994. ISBN: 9783519021308. (Leitfäden und Monographien der Informatik).

KUHL 1996
Kuhl, J.: Angepasste Fuzzy-Regelungssysteme. Entwicklung und Einsatz bei ausgewählten betriebswirtschaftlichen Problemstellungen. Diss. Universität Göttingen. Göttingen: Unitext 1996. ISBN: 3-926-14253-7. (Göttinger Wirtschaftsinformatik 19).

KUHLEN ET AL. 2013
Kuhlen, R.; Seeger, T.; Strauch, D.: Grundlagen der praktischen Information und Dokumentation. 6. Aufl. Berlin [u. a.]: De Gruyter 2013. ISBN: 978-3-11-220398-9. (Handbuch zur Einführung in die Informationswissenschaft und -praxis 1).

KÜMMEKE 2017
Kümmeke, H.: Übersichtsdarstellung der fuzzifizierten Eingangsgrößen und der Ausgangsgrößen des Fuzzy-Controllers. <https://de.wikipedia.org/wiki/Fuzzy-Regler#/media/File:Blockdiagramm_des_Fuzzy-Controllers.png> – 15.12.2017.

LAKOFF 1987
Lakoff, G.: Women, fire, and dangerous things. What categories reveal about the mind. Chicago: Univ. of Chicago Press 1987. ISBN: 0226468046.

LAUX ET AL. 2003

Laux, H.; Gillenkirch, R. M.; Schenk-Mathes, H. Y.: Entscheidungstheorie. 5. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler 2003. ISBN: 3642552587.

LERCH ET AL. 2017

Lerch, S.; Thorarinsdottir, T. L.; Ravazzolo, F.; Gneiting, T.: Forecaster's Dilemma. Extreme Events and Forecast Evaluation. Statistical Science 32 (2017) 1, S. 106–127.

LIEBETRUTH 2016

Liebetruth, T.: Prozessmanagement in Einkauf und Logistik. Instrumente und Methoden für das Supply Chain Process Management. Wiesbaden: Springer Gabler 2016. ISBN: 978-3-658-09758-5.

LINDEMANN ET AL. 2009

Lindemann, U.; Maurer, M.; Braun, T.: Structural complexity management. An approach for the field of product design. Berlin: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-87889-6.

LÖFFLER 2011

Löffler, C.: Systematik der strategischen Strukturplanung für eine wandlungsfähige und vernetzte Produktion der variantenreichen Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart (2011). Stuttgart: Jost-Jetter 2011. ISBN: 978-3939890904. (IPA-IAO Forschung und Praxis 519).

LUHANDJULA 2006

Luhandjula, M. K.: Fuzzy stochastic linear programming. Survey and future research directions. European Journal of Operational Research 174 (2006) 3, S. 1353–1367.

MAMDANI & ASSILIAN 1975

Mamdani, E. H.; Assilian, S.: An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies 7 (1975) 1, S. 1–13.

MAURER 2007

Maurer, M.: Structural Awareness in Complex Product Design. Diss. Technische Universität München (2007). München: Dr. Hut 2007. ISBN: 978-3-89963-632-1.

MEINTRUP & SCHÄFFLER 2005

Meintrup, D.; Schäffler, S.: Stochastik. Theorie und Anwendungen. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-21676-6. (Statistik und ihre Anwendungen).

MÖLLER 2008
Möller, N.: Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme. Diss. Technische Universität München (2008). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0778-5. (Forschungsberichte iwb 212).

MOOSA 2014
Moosa, I.: Operational risk management. New York: Palgrave Macmillan 2014. ISBN: 978-1-349-35295-1.

MOSLER & SCHMID 2006
Mosler, K.; Schmid, F.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und schließende Statistik. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-540-27787-3.

NICOLAI 1995
Nicolai, H.: Entwicklung eines Verfahrens zur Nutzenbewertung von PPS-Systemen auf der Basis der Theorie unscharfer Mengen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Augustinus Buchhandlung 1995. ISBN: 9783860732489. (Aachener Beiträge zu Humanisierung und Rationalisierung 18).

NIEHUES 2017
Niehues, M. R.: Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung. Diss. Technische Universität München (2016). München: Utz 2017. ISBN: 978-3-8316-4650-0. (Forschungsberichte iwb 329).

NOFEN 2006
Nofen, D.: Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum 2006. ISBN: 3939026204. (Berichte aus dem IFA 1/2006).

NORTH 1999
North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. Wiesbaden: Gabler 1999. ISBN: 978-3-409-23029-2.

NYHUIS 2010
Nyhuis, P. (Hrsg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Berlin: Gito 2010. ISBN: 3942183153. (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e. V.).

NYHUIS ET AL. 2004
Nyhuis, P.; Elscher, A.; Kolakowski, M.: Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung. Ganzheitliche Integration von Prozess- und Raumsicht. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 4, S. 95–99.

NYHUIS ET AL. 2006
Nyhuis, P.; Kolakowski, M.; Heger, C.: Evaluation of Factory Transformability – a Systematic Approach. Production Engineering 13 (2006) 1, S. 147–152.

NYHUIS ET AL. 2007
Nyhuis, P.; Heinen, T.; Brieke, M.: Adequate and economic factory transformability and the effects on logistical performance. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 19 (2007) 3, S. 286–307.

NYHUIS ET AL. 2010
Nyhuis, P.; Heinen, T.; Pachow-Frauenhofer, J.: Regelkreisbasierter Ansatz zur Synchronisierung von Wandlungsfähigkeit. Industrie Management 26 (2010) 3, S. 33–37.

OBERKAMPF ET AL. 2002
Oberkampf, W. L.; DeLand, S. M.; Rutherford, B. M.; Diegert, K. V.; Alvin, K. F.: Error and uncertainty in modeling and simulation. Reliability Engineering & System Safety 75 (2002) 3, S. 333–357.

OSTERMEIER 2015
Ostermeier, F.: Changeability of Production Systems. Masterarbeit. Technische Universität München. München (2015).

OXLEY & APSIMON 2011
Oxley, T.; ApSimon, H.: A conceptual framework for mapping uncertainty in integrated assessment. In: Chan, F. et al. (Hrsg.): Proceeding of the 19th International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM. Perth, 12.–16.12.2011 2011, S. 1803–1809.

PAL & BEZDEK 1994
Pal, N. R.; Bezdek, J. C.: Measuring fuzzy uncertainty. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2 (1994) 2, S. 107–118.

PATÉ-CORNELL 1996
Paté-Cornell, M.: Uncertainties in risk analysis. Six levels of treatment. Reliability Engineering & System Safety 54 (1996) 2–3, S. 95–111.

PAWELLEK 2008

Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Berlin, Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 3540784039.

PFEIFER & PROFOS 2008

Pfeifer, T.; Profos, P.: Handbuch der industriellen Meßtechnik. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 3-486-22592-8.

PLATON & CONSTANTINESCU 2014

Platon, V.; Constantinescu, A.: Monte Carlo Method in Risk Analysis for Investment Projects. Procedia Economics and Finance 15 (2014), S. 393–400.

PLEHN ET AL. 2015A

Plehn, C.; Ostermeier, F.; Remmel, F.; Neufville, R. de; Reinhart, G.: Towards a Uniform Understanding of Changeability Terminology – A Multidisciplinary Review. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (2015) (derzeit in Begutachtung).

PLEHN ET AL. 2015B

Plehn, C.; Stein, F.; Reinhart, G.: Modeling Factory Systems Using Graphs. In: Weber, C. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 20th International Conference on Engineering Design, ICED15. Milano, 27.–30.7.2015. Glasgow: Design Society 2015, S. 163–172. ISBN: 978-1-904670-67-4.

POHL 2014

Pohl, J.: Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. Diss. Technische Universtität München (2013). München: Utz 2014. ISBN: 978-3831643585. (Forschungsberichte iwb 284).

PROBST ET AL. 2003

Probst, G.; Raub, S.; Romhardt, K.: Wissen managen. Wiesbaden: Gabler 2003. ISBN: 978-3-322-94791-8.

RASKIN & TAYLOR 2014

Raskin, V.; Taylor, J. M.: Fuzziness, uncertainty, vagueness, possibility, and probability in natural language. In: Gibbs, M. et al. (Hrsg.): Proceeding of th IEEE Conference on Norbert Wiener in the 21st Century, 21CW. Boston, MA, 24.–26.6.2014. Piscataway, NJ: IEEE 2014, S. 1–6. ISBN: 978-1-4799-4562-7.

REFA 1985

REFA: Methodenlehre der Planung und Steuerung Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. München: Hanser 1985. ISBN: 978-3446118782.

REFSGAARD 2011

Refsgaard, J. C.: Climate change adaptation strategies: Water management options under high uncertainty. In: Ministry of Climate and Energy (Hrsg.): Geological Survey of Denmark and Greenland, Science for the Environment. Aarhus, 5.10.2011 2011.

REINHART 1997

Reinhart, G.: Innovative Prozesse und Systeme – Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Kolloquium 1997, müko. München, 27.–28.2.1997. Landsberg/Lech: mi-Verlag 1997, S. 173–202.

REINHART ET AL. 2008

Reinhart, G.; Krebs, P.; Schellmann, H.: Flexibilität und Wandlungsfähigkeit – Das richtige Maß finden. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Kolloquium 2008, müko. München, 9.10.2008. München: Utz 2008, S. 45–56. ISBN: 383160844X.

REINHART ET AL. 2009

Reinhart, G.; Krebs, P.; Zaeh, M. F.: Fuzzy-Logic-based integration of qualitative uncertainties into monetary factory-evaluations. In: IEEE (Hrsg.): International Conference on Control and Automation, 2009, (ICCA). Christchurch, 9.–11.12.2009. Piscataway, NJ: IEEE 2009, S. 385–391. ISBN: 978-1-4244-4706-0.

REUTER 2015

Reuter, R.: Exportweltmeister in der Krise: Experten fordern Umorientierung. München: GBI-Genios 2015. ISBN: 9783737942799.

RIGLING 2003

Rigling, M.: Fuzzy Sets & Fuzzy Logic – Geographische Informationsverarbeitung mit Unsicherem Wissen. <http://www.rigling.net/doku/wibs1.pdf> – 19.10.2017.

ROMMELFANGER 2008

Rommelfanger, H.: Stand der Wissenschaft bei der Aggregation von Risiken. In: Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement e. V. (Hrsg.): Risikoaggregation in der Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer 2008, S. 15–47. ISBN: 978-3-540-73249-5.

ROSCHER 2008

Roscher, J.: Bewertung von Flexibilitätsstrategien für die Endmontage in der Automobilindustrie. Diss. Universität Stuttgart. Stuttgart (2008).

ROSENBLATT & LEE 1987

Rosenblatt, M.; Lee, H.: A robustness approach to facilities design. International Journal of Production Research 25 (1987) 4, S. 479–486.

RÖSIÖ 2012

Rösiö, C.: Supporting the design of reconfigurable production systems. Diss. Jönköping University (2012). Västerås: Mälardalen University Press 2012. ISBN: 978-91-7485-079-6. (Mälardalen University Press dissertations 130).

ROSS ET AL.

Ross, A. M.; Rhodes, D. H.; Hastings, D. E.: Defining changeability. Reconciling flexibility, adaptability, scalability, modifiability, and robustness for maintaining system lifecycle value. Systems Engineering 11 (2008) 3, S. 246–262.

RÖßLER & UNGERER 2008

Rößler, I.; Ungerer, A.: Statistik für Wirtschaftswissenschaftler. Heidelberg: Physica 2008. ISBN: 978-3-7908-1979-3.

RÜHL 2010

Rühl, J.: Monetäre Flexibilitäts- und Risikobewertung. Stochastische Simulation von Produktionssystemen während der Produktentwicklungsphase. Diss. Karlsruher Institut für Technologie (2010). Aachen: Shaker 2010. ISBN: 3832295186.

RYAN ET AL. 2013

Ryan, E. T.; Jacques, D. R.; Colombi, J. M.: An ontological framework for clarifying flexibility-related terminology via literature survey. Systems Engineering 16 (2013) 1, S. 99–110.

SCHENK ET AL. 2014A

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2014. ISBN: 3642054595.

SCHENK ET AL. 2014B
Schenk, W.; Kremer, F.; Beddies, G.; Franke, T.; Galvosas, P.; Rieger, P.: Physikalisches Praktikum. Wiesbaden: Springer 2014. ISBN: 978-3-658-00665-5.

SCHMIGALLA 1995
Schmigalla, H.: Fabrikplanung. Begriffe und Zusammenhänge. 1. Aufl. München, Wien: Hanser 1995. ISBN: 9783446185722. (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).

SCHNATTER 1991
Schnatter, S.: On the propagation of fuzziness of data. Environmetrics 2 (1991) 2, S. 241–251.

SCHNEEWEIß 1991
Schneeweiß, C.: Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer 1991. ISBN: 978-3-540-54000-7.

SCHÖNMANN 2018
Schönmann, A.: Antizipative Identifikation betriebsmittelspezifischer Substitutionsbedarfe mittels Zyklusmodellen. Diss. Technische Universität München. München (2018) – (derzeit in Begutachtung).

SCHOPPE 1991
Schoppe, A.: Behandlungsmöglichkeiten der Unschärfe von Daten und Relationen. Diss. Göttingen: Unitext 1991. ISBN: 9783926142139. (Göttinger Wirtschaftsinformatik 2).

SCHUH ET AL. 2006
Schuh, G.; Gulden, A.; Gottschalk, S.; Kampker, A.: Komplexitätswissenschaft in der Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 4, S. 167–170.

SCHUH ET AL. 2011
Schuh, G.; Kampker, A.; Wesch-Potente, C.: Condition based factory planning. Production Engineering 5 (2011) 1, S. 89–94.

SCHUH ET AL. 2013
Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hausberg, C.; Hohlweger, N.: Strukturbedingte Wandlungsfähigkeit. Nachweis der Abhängigkeit der Wandlungsfähigkeit von der Produktionsstruktur mithilfe von Simulation. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 4, S. 253–291.

SCHULZE ET AL. 2010
Schulze, C.; Reinema, C.; Nyhuis, P.: Merkmalssystematik zur Entwicklung von Fabrikstrukturvarianten. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 105 (2010) 9, S. 815–819.

SESTERHENN 2003
Sesterhenn, M.: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2003. ISBN: 9783832210663. (Berichte aus der Produktionstechnik 1/2003).

SETHI & SETHI 1990
Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in manufacturing: A survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289–328.

SHONKWILER & MENDIVIL 2009
Shonkwiler, R. W.; Mendivil, F.: Explorations in Monte Carlo Methods. New York: Springer 2009. ISBN: 978-0-387-87836-2.

SMITH 2007
Smith, A.: An Inquiry into the Nature and Cause of the Wealth of Nations. Amsterdam: MetaLibri 2007. ISBN: 9781231009819.

SPATH ET AL. 2001
Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.: Ist Flexibilität genug? Zum Management von Turbulenzen sind neue Fähigkeiten gefragt. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 5, S. 235–241.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2010
Statistisches Bundesamt: Export, Import, Globalisierung. Deutscher Außenhandel und Welthandel, 1990 bis 2008. <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/AussenhandelWelthandel5510006099004.pdf?__blob=publicationFile> – 12.12.2017.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2017A
Statistisches Bundesamt: Bruttowertschöpfung des produzierenden Gewerbes in Deutschland von 1991 bis 2016. <https://de-statista-com.eaccess.ub.tum.de/statistik/daten/studie/161208/umfrage/entwicklung-der-bruttowertschoepfung-des-produzierenden-gewerbes-in-deutschland/> – 11.10.2017.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2017B

Statistisches Bundesamt: Deutscher Außenhandel. Export und Import im Zeichen der Globalisierung. <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Aussenhandel/Gesamtentwicklung/AussenhandelWelthandel.html> – 12.12.2017.

STIER 1999

Stier, W.: Empirische Forschungsmethoden. 2. Aufl. Berlin, New York: Springer 1999. ISBN: 978-3-540-65295-3.

STRAMPP 2015

Strampp, W.: Höhere Mathematik 2. Wiesbaden: Springer 2015. ISBN: 978-3-658-09008-1.

STRAND & OUGHTON 2009

Strand, R.; Oughton, D.: Risk and Uncertainty as a Research Ethics Challenge. National Committees for Research Ethics in Norway (2009) 9, S. 1–41.

STROHNER 1990

Strohner, H.: Information, Wissen und Bedeutung. In: Weingarten, R. (Hrsg.): Information ohne Kommunikation? Die Loslösung der Sprache vom Sprecher. Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch 1990, S. 209-226. ISBN: 9783596241859. (Fischer-Sachbuch 4185).

STUCKENSCHMIDT 2009

Stuckenschmidt, H.: Ontologien. Berlin, Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 978-3-540-79330-4. (Informatik im Fokus).

SYSKA 2006

Syska, A.: Produktionsmanagement. Das A–Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute. Wiesbaden: Gabler 2006. ISBN: 9783834902351.

SZEGHŐ & BERCSEY 2007

Szeghő, K.; Bercsey, T.: Kosten- und Risikomanagement in der frühen Phase der Produktentwicklung. In: Meerkamp, H. (Hrsg.): Proceedings of the 18th Symposium on Design for X, DFX. Neukirchen, 11.–12.10.2007 2007, S. 65–72.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL 2017A

Technische Universität Clausthal: Dichte und Verteilungsfunktionen diskreter Wahrscheinlichkeitsverteilungen. <http://www.mathematik.tu-clausthal.de/interaktiv/verteilungen/darstellungdiskret/> – 27.12.2017.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT CLAUSTHAL 2017B
Technische Universität Clausthal: Dichte, Verteilungsfunktionen und Fraktile kontinuierlicher Wahrscheinlichkeitsverteilungen. <http://www.mathematik.tu-clausthal.de/interaktiv/verteilungen/darstellungkontinuierlich/> – 27.12.2017.

THOMOPOULOS 2013
Thomopoulos, N. T.: Essentials of Monte Carlo Simulation. Statistical Methods for Building Simulation Models. New York, NY: Springer 2013. ISBN: 978-1-4614-6022-0.

TOMPKINS 2010
Tompkins, J. A.: Facilities planning. 4. Aufl. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons 2010. ISBN: 2900470444046.

ULRICH & HILL 1976
Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt 5 (1976) 8, S. 345–350.

VDI 3423
VDI 3423: Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Berlin: Beuth 2011.

VDI 3581
VDI 3581: Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. Berlin: Beuth 2004.

VDI 5200
VDI 5200: Fabrikplanung Teil 1: Planungsvorgehen. Berlin: Beuth 2011.

VOLK 2016
Volk, F.: BMW-Werk Mexiko: „Neue Modell-Derivate innerhalb von drei Wochen“. <https://www.automobil-produktion.de/hersteller/wirtschaft/bmw-werk-mexiko-neue-modell-derivate-innerhalb-von-drei-wochen-124.html> – 10.12.2017.

WALDI 2015
Waldi, R.: Statistische Datenanalyse. Grundlagen und Methoden für Physiker. Berlin, Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-662-47144-9.

WALKER ET AL. 2003
Walker, W. E.; Harremoës, P.; Rotmans, J.; van der Sluijs, J. P.; van Asselt, M.; Janssen, P.;

Krayer von Krauss, M. P.: Defining Uncertainty. A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. Integrated Assessment 4 (2003) 1, S. 5–17.

WEIDIG & AURICH 2014
Weidig, C.; Aurich, J. C.: Virtuelle Lernfabrik Kaiserslautern. Eine Lernfabrik für die VR-unterstützte Fabrikplanung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 10, S. 747–751.

WENGERT & SCHITTENHELM 2013
Wengert, H.; Schittenhelm, F. A.: Corporate Risk Management. Berlin, Heidelberg: Springer 2013. ISBN: 978-3-642-36688-8.

WESTERMEIER 2016
Westermeier, M.: Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen. Diss. Technische Universität München (2016). München: Utz 2016. ISBN: 3831645868.

WESTKÄMPER ET AL. 2000
Westkämper, E.; Zahn, E.; Balve, P.; Tilebein, M.: Ansätze zur Wandlungsfähigkeit von Produktionsunternehmen. wt Werkstattstechnik online 92 (2000) 4, S. 121.

WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2000
Wiendahl, H.-P.; Hernández Morales, R.: Wandlungsfähigkeit – neues Zielfeld in der Fabrikplanung. Industrie Management 16 (2000) 5, S. 37–41.

WIENDAHL & HERNÁNDEZ MORALES 2006
Wiendahl, H.-P.; Hernández Morales, R.: The Transformable Factory – Strategies, Methods and Examples. In: Dashchenko, A. I. (Hrsg.): Reconfigurable Manufacturing Systems and Transformable Factories. Berlin, Heidelberg: Springer 2006, S. 383–393. ISBN: 978-3-540-29391-0.

WIENDAHL 2002
Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 4, S. 122–127.

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. 2009
Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Reichardt, J.: Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl. München: Hanser 2009. ISBN: 978-3-446-43892-7.

WIENDAHL ET AL. 2015
Wiendahl, H.-P.; Reichardt, J.; Nyhuis, P.: Handbook factory planning and design. Heidelberg: Springer 2015. ISBN: 978-3-662-46391-8.

WINKER 2017
Winker, P.: Empirische Wirtschaftsforschung und Ökonometrie. 4. Aufl. Berlin: Gabler 2017. ISBN: 978-3-662-49299-4.

ZADEH 1965
Zadeh, L. A.: Fuzzy sets. Information and Control 8 (1965) 3, S. 338–353.

ZÄH ET AL. 2004
Zäh, M. F.; Müller, N.; Prasch, M.; Sudhoff, W.: Methodik zur Erhöhung der Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 4, S. 173–177.

ZÄH ET AL. 2009
Zäh, M. F.; Hagemann, F.; Teufelhart, S.: Form-flexible tools for injection molding: Approach for the economic application of injection molding for small lot sizes. Production Engineering 3 (2009) 3, S. 281–285.

ZIMMERMANN 2001
Zimmermann, H.-J.: Fuzzy Set Theory—and Its Applications. Dordrecht: Springer Netherlands 2001. ISBN: 978-94-010-3870-6.

ZIMMERMANN 2010
Zimmermann, H.-J.: Fuzzy set theory. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics 2 (2010) 3, S. 317–332.

ZÜRN 2010
Zürn, M.: Referenzmodell für die Fabrikplanung auf Basis von Quality Gates. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2010. (IPA-IAO Forschung und Praxis 497).