

Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Unzeitig

Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften

eingereicht an der

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT GRAZ



Betreuer und Erstbegutachter

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Ramsauer

Zweitbegutachter

Univ.-Prof. Dr.rer.soc.oec. Marc Reimann

Graz, November 2014

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

Wolfgang Unzeitig

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand zu einem Großteil während meines Arbeitens am Forschungsprojekt „Szenariobasierte Planungsumgebung in der Digitalen Fabrik“, welches am VIRTUAL VEHICLE durchgeführt wurde. Das Kompetenzzentrum VIRTUAL VEHICLE wird im Rahmen von COMET - Competence Centers for Excellent Technologies durch das Österreichische Bundesministerium für Verkehr und Technologie, das Österreichische Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH, das Land Steiermark sowie die Steirische Wirtschaftsförderung gefördert. Ich danke dem beteiligten Projektpartner, sowie dem Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung an der Technischen Universität Graz und dem Institut für Produktion und Logistik an der Karl-Franzens-Universität Graz.

Mein besonderer Dank gilt meinen betreuenden Professoren, Herrn Prof. Christian Ramsauer und Herrn Prof. Marc Reimann, für die tatkräftige Unterstützung und kollegiale Beratung während meines Doktoratsstudiums. Die fruchtbaren Diskussionen bildeten eine äußerst wertvolle Grundlage für diese Dissertation. Durch die Anregungen von Herrn Prof. Walter Schwaiger und Herrn Prof. Ernst Stadlober konnte die Arbeit noch um bedeutende Aspekte erweitert werden.

Ebenfalls bedanke ich mich herzlich bei meinen Kollegen am VIRTUAL VEHICLE, am Institut für Industriebetriebslehre und Innovationsforschung und den vielen beteiligten Mitarbeitern beim Projektpartner für die Unterstützung, Diskussionen und hilfreiche Kritik. Die vielen Gespräche, im Speziellen mit Frau Dr. Jelena Rubesa und Frau Mag. (FH) Marlene Schafner, sowie mit den Herren Dipl.-Ing. (FH) Markus Flasch, Dr. Alexander Stocker, Dr. Michael Schmeja, Dipl.-Ing. Hans Peter Schnöll und Dr. Christian Nußbaumer, haben mir wesentlich zum besseren Verstehen der Thematik verholfen und zum Fortschritt der Arbeit beigetragen.

Abschließend danke ich ganz besonders meinen Eltern Theresia und Horst, sowie Melanie für die große Unterstützung und zahlreichen Anregungen bei der Umsetzung dieses Vorhabens.

Graz, im November 2014

.....
Wolfgang Unzeitig

Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer erweiterten Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Phase der Fabrikplanung. In dieser Phase steht der Planungsexperte Unsicherheiten gegenüber, die in Bezug auf Produkt-, Produktions-, Prozess- und Ressourceninformationen aufgrund der Einzigartigkeit des Vorhabens, einer Variabilität bei den zu planenden Produkten und der Unklarheiten bei den genannten Informationen auftreten. Die Literatur bietet qualitative und quantitative Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten, wobei eine Methode auf der Basis der Stochastik die Hauptanforderungen der Fabrikplanung am besten erfüllt. Hierbei führt eine Vernachlässigung der linearen Abhängigkeiten der einzelnen Dimensionierungsgrößen Personal, Flächen und Betriebsmittel je Produktionsgewerk im Zuge der Aggregation der quantifizierten Risiken zu einer Unterschätzung des Gesamtrisikos. Die Berücksichtigung dieser Abhängigkeiten in Form von Korrelationen steht daher im Mittelpunkt dieser Arbeit.

Die entwickelte Methodik wird in drei Grundelemente gegliedert. Im ersten Element wird für die Korrelationen der Dimensionierungsgrößen von der betrachteten Fabrik anhand eines mathematischen Modells auf Basis der Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Das dafür notwendige Kostenmodell der Fabrik kann dabei in unterschiedlicher Komplexität und Detaillierung verwendet werden. Das zweite Element beinhaltet die Quantifizierung der Unsicherheiten je Dimensionierungsgröße, wobei die Normalverteilung zur Beschreibung des wahrscheinlichen Bereichs ausgewählt wird. Zuletzt werden die Unsicherheiten zu Detailrisiken und zu einem Gesamtrisiko unter Einbeziehung der ermittelten Korrelationen aggregiert. Verschiedene Auswertungen und Analysen schließen die Methodik ab, wodurch eine Risikoabschätzung sowie Risikominimierung ermöglicht wird.

Die Verifikation der mathematischen Modelle erfolgt durch den Vergleich von Berechnungsdaten mit historischen Daten einer realen Fabrik eines europäischen Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen. Das Ergebnis verdeutlicht eine realistische Ermittlung der Korrelationen mit dem verwendeten Kostenmodell im Vergleich zu historischen Daten. Die Berücksichtigung von Korrelationen vergrößert das Gesamtrisiko im Vergleich zur Berechnung mit Korrelationskoeffizienten vom Wert 0 deutlich. Dadurch wird die Annahme der Risikounterschätzung bei Vernachlässigung der Abhängigkeiten wesentlich gestützt. Anhand erhobener Anforderungen für die Methodik wird die Anwendbarkeit für das Beispiel des Auftragsfertigers validiert.

Die vorgestellte Methodik unter Einbindung der verifizierten mathematischen Modelle bietet die Möglichkeit zur Quantifizierung von Unsicherheiten, die bei den Dimensionierungsgrößen der Fabrikplanung auftreten. Hierbei können die Korrelationen dieser Größen zueinander berechnet und bei der Risikoaggregation berücksichtigt werden. Die Methodik liefert somit die Basis für eine verbesserte Risikobetrachtung bei Fabrikplanungen, die eine Unterschätzung des Risikos verhindert.

Abstract

The objective of this thesis is to develop an advanced method to consider uncertainties during the early phase of planning a factory. The planning expert faces uncertainties related to information concerning the product, production, process and resources caused by the uniqueness of the project, the variability of the planned products and the unclarity of various kinds of information. The literature provides qualitative and quantitative methods to deal with uncertainties, of which a method based on stochastics meets the requirements of factory planning best. If the linear dependencies of the dimension parameters of staff, area and means of production are not included in the aggregation of the quantified risk, cumulative risk will be underestimated. The consideration of these dependencies in terms of correlations is the main focus of this thesis.

The developed method is divided into three main elements. During the execution of the first element the correlations of the dimension parameters are calculated for a specific factory. The required mathematical model is based on a Monte-Carlo-Simulation using a cost model of the factory. The complexity and level of detail can vary depending on the application. The second element implies the quantification of the uncertainties of each dimension parameter by using the normal distribution. In the last step the risk is aggregated to diverse cumulative risk functions including the correlation effects. Diverse graphical analyses and key figures are provided in order to estimate and minimize the risk of a specific planning project.

The mathematical models are verified by comparing calculated data with historical data, which are related to a real factory of an European contract manufacturing company for complete vehicles. The result shows a realistic calculation of the correlations with the used cost model in comparison with the historical data. Using correlation coefficients substantially increases the result for the overall risk in comparison with an aggregation using correlation coefficients of the value 0. This clearly supports the assumption of underestimating the risk by ignoring dependencies. Finally the developed method is validated using a catalogue of requirements for application at the contract manufacturing company.

The presented method offers the opportunity to quantify uncertainties that occur with regard to dimension parameters during factory planning. It is possible to calculate the correlations of these parameters and to consider them during risk aggregation. This method therefore provides the basis for an improved risk analysis during factory planning, which prevents an underestimation of risk.

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	10
Symbolverzeichnis	11
1 Einleitung	13
1.1 Ausgangssituation	13
1.2 Problembeschreibung, Forschungsfragen, Zielsetzung und Relevanz	15
1.2.1 Problembeschreibung	15
1.2.2 Forschungsfragen	16
1.2.3 Zielsetzung und Relevanz	17
1.3 Forschungsdesign und Gliederung	18
2 Grundlagen und Stand der Technik	20
2.1 Vorgehensweise zur Literaturrecherche	20
2.2 Überblick über die betroffenen Fachgebiete	21
2.3 Fabrikplanung	22
2.3.1 Begriffsdefinitionen	22
2.3.2 Phasen der Fabrikplanung	28
2.3.3 Fabrikplanung mithilfe der Werkzeuge der Digitalen Fabrik	30
2.3.4 Modell-, Methoden- und Methodikbegriff	32
2.3.5 Fabrikplanung und der Produktentstehungsprozess	34
2.3.6 Herausforderung im Zuge der frühen Fabrikplanung	35
2.4 Angebotslegung	36
2.4.1 Vorkalkulation im Rahmen der Kostenrechnung	37
2.4.2 Methoden der Vorkalkulation	40
2.4.3 Schnittstellen der Angebotslegung mit der frühen Fabrikplanung	50
2.5 Risikomanagement	57
2.5.1 Der Risikobegriff	57
2.5.2 Unterscheidung von Unsicherheit und Risiko	58
2.5.3 Definition von Risikomanagement	60
2.5.4 Schnittstelle des Risikomanagements mit der frühen Fabrikplanung und Angebotslegung	66
2.6 Statistische Methoden	68
2.6.1 Überblick über die Grundbegriffe der mathematischen Statistik	69

2.6.2	Wichtige Verteilungen	72
2.6.3	Multivariate Statistik	75
2.6.4	Konfidenzintervall	78
2.6.5	Schnittstelle der statistischen Methoden mit der frühen Fabrikplanung, Angebotslegung und Risikomanagement	81
2.7	Quantifizierungsmöglichkeiten von Unsicherheiten	83
2.7.1	Modellierung von Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen	86
2.7.2	Modellierung der Abhängigkeiten der Unsicherheitsfaktoren	87
2.7.3	Mathematisches Modell nach der Portfolio-Theorie nach Markowitz .	91
2.7.4	Interpretation der Anwendung der Quantifizierung von Unsicherheiten bei frühen Fabrikplanungen	96
2.8	Zwischenfazit	97
3	Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten	99
3.1	Vorgehensweise zur Methodik- und Modellentwicklung	99
3.2	Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik	100
3.3	Systemgrenzen	102
3.3.1	Fabrikplanung	103
3.3.2	Unsicherheiten	107
3.3.3	Kosten	110
3.4	Modellbildung	111
3.4.1	Gemeinsamkeiten und Unterschiede: Unsicherheiten bei Portfolios und Fabrikplanungen	112
3.4.2	Mathematisches Modell der Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen	118
3.4.3	Übersicht über die Vorgehensschritte im mathematischen Modell . .	150
3.4.4	Analyse des betrachteten Risikos	152
3.5	Gesamtprozess zur Methodik	164
3.6	Zwischenfazit	165
4	Prototypische Umsetzung der Methodik	167
4.1	Vorgehensweise im Anwendungsfall	167
4.2	Daten im Anwendungsfall	168
4.2.1	Geheimhaltung der Daten	168
4.2.2	Anwendungsfall	169
4.3	Die Herausforderungen der Gesamtfahrzeugproduktion in der europäischen Automobilindustrie	170
4.3.1	Die europäische Automobilindustrie	170
4.3.2	Vielfalt an Produktvarianten	171
4.3.3	Geschäftsfälle eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen	171

4.3.4	Herausforderungen eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen im Zuge der frühen Fabrikplanung	172
4.3.5	Verbesserungspotential im Anwendungsfall hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten	174
4.4	Veranschaulichendes Beispiel zur Modellumsetzung	175
4.4.1	Relatives Kostenfaktormodell am veranschaulichenden Beispiel	176
4.4.2	Monte-Carlo-Simulation zur Korrelationsanalyse am veranschaulichenden Beispiel	179
4.4.3	Ermittlung von Kosten und Risiken am veranschaulichenden Beispiel	181
4.5	Umsetzungsbeschreibung im Anwendungsfall	182
4.5.1	Relatives Kostenfaktormodell im Anwendungsfall	182
4.5.2	Monte-Carlo-Simulation zur Korrelationsanalyse im Anwendungsfall	183
4.5.3	Ermittlung von Kosten und Risiken im Anwendungsfall	184
4.5.4	Risikoübersicht im Anwendungsfall	187
4.6	Zwischenfazit	189
5	Verifikation und Validierung	191
5.1	Vorgehensweise zur Verifikation des mathematischen Modells und der Methodik	191
5.2	Verifikation der mathematischen Teilmodelle	193
5.2.1	Verifikation der Korrelationskoeffizienten	193
5.2.2	Sensitivitätsanalyse und Grenzwerttest beim mathematischen Modell	200
5.2.3	Verifikation der Normalverteilung	205
5.3	Validierung der Methodik und des Gesamtmodells	206
5.3.1	Demonstration der Möglichkeiten durch die entwickelte Methodik	206
5.3.2	Zusammenfassung der Anforderungserfüllung auf Basis der Demonstration der Möglichkeiten	208
5.3.3	Auswirkungen durch Einführung der Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten	212
5.3.4	Beantwortung der Forschungsfragen	213
5.4	Zwischenfazit	214
6	Zusammenfassung und Ausblick	217
6.1	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse	217
6.1.1	Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase	217
6.1.2	Quantifizierung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase	217
6.1.3	Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase	218
6.2	Ausblick	220
6.2.1	Mögliche Erweiterung der Systemgrenzen	220

6.2.2	Mögliche zukünftige Entwicklungen	220
	Literaturverzeichnis	222
	Abbildungsverzeichnis	234
	Tabellenverzeichnis	238
	Anhang	240

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
B	Betriebsmittel
beurt.	beurteilt
CER	Cost Estimating Relationships
CPM	Critical Path Method
F	Flächen
FEM	Finite Element Method
ggf.	gegebenenfalls
KAM	Key Account Manager
KNN	Künstliche neuronale Netze
L	Lack
M	Montage
MC	Monte-Carlo
MCS	Monte-Carlo-Simulation
Mio.	Million(en)
OEM	Original Equipment Manufacturer
P	Personal
PERT	Program Evaluation and Review Technique
PPR-Modell	Produkt-, Prozess-, Ressourcenmodell
Q-Q-Plot	Quantile-Quantile-Plot
R	Rohbau
rel	relativ
SCM	Supply Chain Management
SZ	Jahresstückzahl
tw.	teilweise
VaR	Value-at-Risk
vorh.	vorhanden
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
A	Ausprägung A
AI	Arbeiter der Instandhaltung
AL	Arbeiter der Linie
Ang	Angestellte
an	prozentueller Anteil
AND	Logisches Und
BM^M	Betriebsmittel Montage
c	Konfidenz
Corr	Korrelationsmatrix
Cov	Kovarianz
$DDim$	Detaildimensionierungsgröße
Dim	Dimensionierungsgröße
Dim	Zufallsvektor der Dimensionierungsgrößen
E	Erwartungswert
Ef	Einflussfaktor
EK	Einzelkosten
f_X	Dichtefunktion der Ereignisse X
F_X	Verteilfunktion der Ereignisse X
g	Anzahl der Fälle
Gew	Gewerk
GK	Gesamtkosten
h	relative Häufigkeit
i	ganzzahlige Variable
k	absolute Häufigkeit
In	Inputwert
j	ganzzahlige Variable
MCov	Kovarianzmatrix

Symbol	Beschreibung
MA	Maschinen
MEf	Einflussfaktormatrix
n	ganzzahlige Variable
m	Gesamtzahl der Fälle
PK_{WS}	Personalkosten der wertschöpfenden Tätigkeiten
OR	einschließendes Oder
p	Prozent
P	Wahrscheinlichkeit
Pe^{RB}	Personal Rohbau
r	Korrelationskoeffizient einer Stichprobe
RTA	Teileanzahl im Rohbau
s	Standardabweichung einer Stichprobe
SZ	Jahresstückzahl
SEf	Summe der Einflussfaktoren
v	Variationskoeffizient
Var	Varianz
W	Wert
W_{BM}	Wert der Betriebsmittel
W_P	Wert eines Portfolios
WL	Werkzeuge/Ladungsträger
x	Portfoliogewichtung
X	Zufallsvektor
X	Stichprobe
X_i	Zufallsvariable, zufällige Ereignisse
Y	Zufallsvariable
Z	Zufallsvariable
XOR	ausschließendes Oder
ξ_P	Quantil mit der Wahrscheinlichkeit P
μ	Mittelwert der Grundgesamtheit
ρ	Korrelationskoeffizient der Grundgesamtheit
σ	Standardabweichung der Grundgesamtheit

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die frühe Fabrikplanungsphase bietet aufgrund begrenzter Informationen, Zeit und Ressourcen zahlreiche spezifische Herausforderungen, denen Fabrikplanungsexperten mit geeigneten Methoden begegnen müssen. In der Literatur (vgl. beispielsweise Wiendahl et al. (2009), Grundig (2013), Bracht et al. (2011), Schenk et al. (2004)) wird Fabrikplanung in unterschiedliche Phasen unterteilt, wobei die Phasen Vorbereitung, Strukturplanung, Detailplanung, Ausführungsplanung und Ausführung als Übersicht definiert werden (vgl. Grundig (2013, S. 38)). In dieser Arbeit wird die frühe Fabrikplanungsphase mit den zwei Arbeitsschritten Vorbereitung und Strukturplanung definiert, wie in Abbildung 1.1 dargestellt ist.

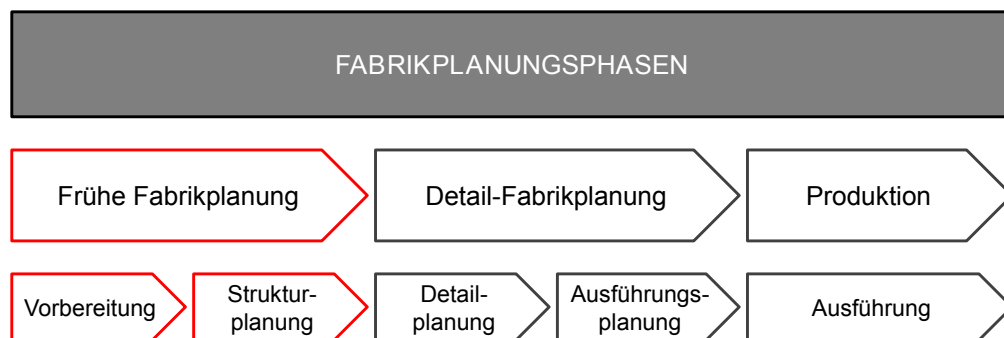


Abb. 1.1: Übersicht über die Fabrikplanungsphasen (eigene Darstellung in Anlehnung an Grundig (2013, S. 38))

Aufgrund der Entwicklung der europäischen Automobilproduktion des letzten Jahrzehnts können die besonderen Herausforderungen beispielhaft für Produktionsbetriebe in einem volatilen Markt aufgezeigt werden. Die herausfordernde Marktsituation ist gekennzeichnet durch jährliche Gesamtstückzahlschwankungen der europäischen Automobilproduktion von bis zu -17 und +26 Prozent in den letzten zehn Jahren und eine mannigfaltige Struktur der Original Equipment Manufacturer (OEM) mit unterschiedlichen Märkten auf relativ kleinem Raum sowie mit kleinem Kundenkreis verglichen zur Gesamtweltbevölkerung (vgl. International Organization of Motor Vehicle Manufacturer (2014)). Ein Auftragsfertiger für Gesamtfahrzeuge befindet sich in diesem Markt nicht nur im Wettbewerb mit seinen Konkurrenten, sondern auch mit den Produktionsstätten seiner Kunden, die ebenfalls um eine entsprechende Auslastung kämpfen, wodurch ein besonderer Druck auf die

Angebotslegung entsteht (vgl. Unzeitig et al. (2013, S. 72)). Für diesen Auftragsfertiger bietet die Möglichkeit einer detaillierten und effizienten Planung in einer frühen Phase einen entscheidenden Wettbewerbsvorteil, um einen Fertigungsauftrag gewinnen zu können. Nur mit dem Wissen über das eigene Potential in den Produktionsstätten können treffsichere Angebote auf Basis der Fabrikplanung gelegt werden.

Zusammengefasst bietet die Automobilindustrie eine Vielzahl an Besonderheiten, weshalb diese Industrie der vorliegenden Arbeit als Fallstudie dient. Die Produktion von Gesamtfahrzeugen befindet sich hierbei in einem wirtschaftlichen Umfeld von wenigen großen Verträgen, die Fertigungen von hohen Stückzahlen mit hohen Qualitätsansprüchen in einem komplexen Lieferantennetzwerk regeln (vgl. Bracht et al. (2011, S. 268) und Buch et al. (2011, S. 3002)). Zusätzlich prägen die vielfältigen kundenspezifischen Ausstattungsmerkmale, die eine beinahe unüberschaubare Variantenvielfalt bewirken, den europäischen Markt dieses komplexen Produktes (vgl. Ramsauer (2009, S. 22)). Diese Herausforderungen treffen dabei in besonderem Maß auch die Planungsexperten der frühen Fabrikplanung.

Zukunftsbezogene Planungstätigkeiten und Entscheidungen werden grundsätzlich von Unsicherheiten beeinflusst (vgl. Laux et al. (2012, S. 81) und Knight (1921, S. 187)). Die Unsicherheiten der Fabrikplanung basieren auf unzureichend detaillierten Informationen in den Bereichen, die das Produkt, die Produktionsanforderungen, den Produktionsprozess sowie die Produktionsressourcen betreffen (vgl. Bracht et al. (2011, S.288) und Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S. 5 f.)). Hierbei stellen die Produkt- und Produktionsinformationen exogene Daten dar, während Prozess- und Ressourceninformationen durch den Planer beeinflusst werden. Generell ist es die Aufgabe der Fabrikplanungsabteilung, einen Kompromiss bei der Planung der Dimensionierungsgrößen zu finden. Diese Größen sind dabei entweder von größeren Unsicherheiten bei einem geringeren Einsatz von Zeit und Ressourcen der Planungsexperten oder von geringeren Unsicherheiten bei einem höheren Einsatz betroffen. In beiden Fällen müssen jedoch die exogenen Unsicherheiten beachtet werden, welche die Planung unabhängig von den Expertenaktivitäten in einem großen Ausmaß beeinflussen. In einer Fallstudie bei einem europäischen Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen wurde eine ungenügende Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung und der damit verbundenen Angebotslegung beobachtet. Das Ergebnis von mehr als zwanzig Experteninterviews im Zuge des betrachteten Anwendungsfalls bekräftigt einen optimierbaren Umgang mit Unsicherheiten, der vielfach auf einer personenbezogenen, schwierig nachvollziehbaren und erfahrungsbasierten Aufschlagkalkulation beruht.

Werden Unsicherheiten nicht oder nur teilweise durch transparente Risikoaufschläge berücksichtigt, fehlen den Entscheidungsträgern bei Preisentscheidungen Informationen um zu quantifizieren, welches Risiko einerseits mit dem definierten Preis eingegangen wird und andererseits welche Detailgrößen den größten Anteil am Gesamtrisiko besitzen.

Mit diesem Wissen wird sowohl die Entscheidung in Preisverhandlungen auf eine fundierte Basis gestellt, als auch das Ausschöpfen von Risikoreduktionspotentialen ermöglicht.

In der Literatur werden verschiedene Ansätze beschrieben, um Unsicherheiten quantitativ und qualitativ berücksichtigen zu können (vgl. unter anderen Chou (2011) und Niazi et al. (2006)). Ausgehend von der Finanzwirtschaft nach der Portfolio-Theorie nach Markowitz (1959) existieren in verschiedenen Bereichen, wie beispielsweise dem Projektmanagement oder der Baubranche (vgl. unter anderen Yang (2011) und Cooper et al. (2005)), etablierte Methoden, die auf der Basis verschiedener mathematischer Modelle aufgebaut sind. In einem der Ansätze wird dabei ein Versuch unternommen, die Risikobewertung in die Angebotslegung von individualisierten Produkten zu integrieren (vgl. Rimpau (2010)). Jedoch existiert bei dieser Arbeit Verbesserungspotential hinsichtlich der Anwendbarkeit bei der Fabrikplanung von komplexen Produkten, wie beispielsweise von Gesamtfahrzeugen, sowie hinsichtlich der Berücksichtigung von Abhängigkeiten der Risiken, denen bei der Aggregation zu einem Gesamtrisiko eine besondere Bedeutung zukommt (vgl. unter anderen Gleißner (2004), Wall (1997) und Touran & Wiser (1992)). Eine Vernachlässigung dieser Abhängigkeiten führt zu einer maßgeblichen Unterschätzung des Gesamtrisikos (vgl. ebenda). Die spezifischen Anforderungen der frühen Fabrikplanung stellen eine besondere Herausforderung bei der Anwendung der Methoden dar, bieten jedoch auch die Möglichkeit, Korrelationen nicht nur vergangenheitsbezogen, sondern auch zukunftsbezogen mit einzubinden.

1.2 Problembeschreibung, Forschungsfragen, Zielsetzung und Relevanz

1.2.1 Problembeschreibung

Die Ursache für Unsicherheiten liegt oftmals in einer Unvorhersehbarkeit von Ereignissen in der Zukunft (vgl. Buzacott et al. (2013, S.1)). Besteht eine Möglichkeit, diese Unsicherheiten in Form von Beschreibungen über das wahrscheinliche Eintreten von bestimmten Ausprägungen der Ereignisse zu quantifizieren, ist der erste Schritt getan, Unsicherheiten in abschätzbare Risiken zu transferieren (vgl. Buzacott et al. (2013, S.1 f.) und Dowd (1998, S. 3 f.)). Knight (1921, S. 9) definiert Risiken als beschreibbare Unsicherheiten. Mit den Risiken beschäftigt sich das Fachgebiet des Risikomanagements ausführlich und bietet verschiedene Vorgehensweisen und Strategien (vgl. unter anderen Rogler (2002) und Gleißner & Wolfrum (2001)). Durch transparente und kalkulierbare Unsicherheiten können Planungsexperten und Entscheidungsträger der frühen Fabrikplanung unterstützt werden. Vorhandene Methoden zur Quantifizierung von Unsicherheiten aus anderen Bereichen und Branchen bieten einerseits eine ungenügende Möglichkeiten zur Anpassung an die speziellen Anforderungen der frühen Fabrikplanungsphase für die Herstellung komplexer Produkte wie Gesamtfahrzeuge (vgl. unter anderen Yang (2011), Rimpau (2010),

Gleißner & Wolfrum (2001) und Touran & Wiser (1992)), und andererseits berücksichtigen nicht alle Ansätze die Abhängigkeiten der Risiken bei der Aggregation (vgl. Rimpau (2010, S. 148 f.)). Um eine erweiterte Methodik zum Umgang mit den Unsicherheiten im Zuge der frühen Phase der Fabrikplanung zu entwickeln, werden nachfolgende Forschungsfragen gestellt.

1.2.2 Forschungsfragen

Das Problemfeld der Forschungsarbeit kann anhand von folgenden drei Forschungsfragen näher eingegrenzt und präzisiert werden.

Forschungsfrage 1: Welche Arten von Unsicherheiten treten im Zuge der frühen Fabrikplanung auf?

Im Mittelpunkt dieser Fragestellung steht die Analyse, mit welchen Arten von Unsicherheiten Planungsexperten im Zuge der frühen Fabrikplanung rechnen müssen und auf welchen Ursachen jene basieren. Kann für die Unsicherheiten und deren Ursachen eine einheitliche Einteilung getroffen werden? Zum Zeitpunkt der frühen Fabrikplanung und der Angebotslegung ist häufig das Produkt aufgrund von Simultaneous Engineering Ansätzen in der Produktentwicklung nicht vollständig entwickelt. Neben den Unsicherheiten der nicht vollständig vorhandenen Daten über das Produkt und die Produktionsanforderungen plant der Planungsexperte der Fabrik die Produktionsprozesse und dimensioniert Ressourcen, wobei auch in dieser Tätigkeit Unsicherheiten auftreten. Es werden alle Daten analysiert, die der Planer für seine Planung benötigt und die er als Output generiert. Über die Definition der Beziehungen der Outputgrößen mit den Inputgrößen können Gemeinsamkeiten und Ursachen ermittelt werden.

Forschungsfrage 2: Wie können die Unsicherheiten der frühen Fabrikplanung quantifiziert werden?

Es wird die Herausforderung definiert, die Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung quantitativ zu erfassen. Durch den Transfer von Unsicherheiten in quantifizierte Risiken wird das Potential geschaffen, Methoden und Werkzeuge des Risikomanagements im Zuge der Fabrikplanung einzusetzen. In der Literatur existieren verschiedene Methoden zum Umgang mit Unsicherheiten, wobei die Auswahl einer Methode auf Basis der spezifischen Anforderungen der Fabrikplanung getroffen wird. Im Vordergrund stehen hierbei ein geringer Zusatzaufwand für den Planungsexperten und eine nachvollziehbare Aggregationsmöglichkeit zu einem Gesamtrisiko, wobei die Dimensionierungstätigkeiten

und Planungsaktivitäten durch die Methodik möglichst gering beeinflusst werden und eine Planung im Detail weiterhin durchgeführt werden kann.

Forschungsfrage 3: Wie können quantifizierte Unsicherheiten in eine Risikobewertung der frühen Fabrikplanung übertragen werden?

Nachdem die Einzelrisiken in Forschungsfrage 2 quantifiziert werden, besteht der Fokus der Forschung in der Entwicklung einer Gesamtmethodik für die Risikobewertung der Fabrikplanung in der frühen Phase. Im ersten Schritt wird ein mathematisches Modell erstellt, das in der Lage ist, die quantifizierten Einzelrisiken zu Detail- und Gesamtrisiken zu aggregieren. Eine besondere Herausforderung stellen hierbei die Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen untereinander dar, die auch die Risikoaggregation beeinflussen. Auf Basis des mathematischen Modells wird untersucht, welche Methodik die Risikobewertung für eine spezifische Fabrik unterstützt. Neben der Berechnung der Risiken stehen dabei die Analysemöglichkeiten im Mittelpunkt, die den Experten und Entscheidungsträgern Detail- und Übersichtsinformationen über Risiken für ein spezifisch zu planendes Produkt geben.

1.2.3 Zielsetzung und Relevanz

Das Ziel dieser Forschungsarbeit besteht in der Entwicklung einer Methodik unter Einbindung eines mathematischen Modells, um Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase von herausfordernden Produkten mit komplexen Produktionsanforderungen in einer effizienten Weise zu berücksichtigen und in eine Risikobetrachtung transferieren zu können. Bei Einzelrisiken, die zu einem Gesamtrisiko aggregiert werden, besteht die Herausforderung, dass die Abhängigkeiten der Größen, auf die sich die Risiken beziehen, im mathematischen Modell mitberücksichtigt werden müssen.

Bei der Angebotslegung von komplexen Produkten, die noch nicht produziert werden, besteht ein wichtiger Prozessschritt in der Dimensionierung der Produktionsressourcen Personal, Flächen und Betriebsmittel, der auch als technische Kalkulation bezeichnet wird (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 463 f.)). Diese Informationen in Kombination mit der monetären Bewertung als Output der kaufmännischen Kalkulation bieten die Grundlage für die Kostenkalkulation des Produkts und beeinflussen das Risiko, das bei Preisentscheidungen in Kauf genommen wird. Letztendlich wird durch Einführung einer Methodik zur Ermittlung des Risikos der wirtschaftliche Erfolg des Unternehmens beeinflusst, da die Entscheidungsträger einerseits die möglichen Auswirkungen von Preisbildungen abschätzen können und andererseits zusätzliche Aktivitäten durchgeführt werden können,

um Größen, die mit einem besonders hohen Risiko behaftet sind, detaillierter zu betrachten und deren Potential zur Risikoreduktion zu analysieren.

1.3 Forschungsdesign und Gliederung

Die vorliegende Arbeit wird in sechs Schritte gegliedert, wobei diese sich an den Schritten des grundlegenden Forschungsdesigns nach Ramsauer (2013b, S. 12) orientiert. Abbildung 1.2 stellt eine Übersicht der Gliederung dieser Arbeit dar.

Nach der Hinführung zum Thema wird ein Überblick über die Behandlung des Problems in der Literatur gegeben. Nachdem im Zuge dieser Arbeit mehrere Fachgebiete, beispielsweise die Fabrikplanung und das Risikomanagement, betroffen sind, werden die relevanten Teile aus diesen diskutiert und die davon angewendeten Lösungen vorgestellt. Die bestehenden Methoden werden daraufhin den Anforderungen der frühen Fabrikplanungsphase gegenübergestellt und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Das Ergebnis der Literaturrecherche beinhaltet sowohl einen Überblick über den Stand der Technik im Hinblick auf die Berücksichtigung von Unsicherheiten, als auch die Auswahl der wesentlichen Elemente für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik, wobei die Forschungslücke im Detail dargestellt wird.

Im nächsten Schritt wird die Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten entwickelt. Zuerst wird hierbei eine bestehende Methodik aus einem Fachgebiet der Finanzwirtschaft in die Aufgabenstellung übertragen und für die Anforderungen der frühen Fabrikplanung adaptiert. Daraufhin folgt die Methodikentwicklung zur Ermittlung der Korrelationen und die mathematische Modellbildung zur Aggregation des Gesamtrisikos. Abschließend werden Möglichkeiten zur Analyse und Minimierung des Risikos diskutiert. Die beschriebenen Elemente werden dann zu einer übergreifenden Methodik zusammengeführt.

Anhand eines konkreten Anwendungsfalls einer Fabrik, in der ein Auftragsfertiger am europäischen Markt Gesamtfahrzeuge produziert, werden die Probleme der Unsicherheiten bearbeitet und mit der entwickelten Methodik zu lösen versucht. Unsicherheiten werden für ein fiktives Produkt, das für die reale Fabrik geplant wird, quantifiziert und mittels einer Matrix auf Basis von Definition realer Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen aggregiert. Anschließend werden die Detailrisiken und das Gesamtrisiko sowohl graphisch als auch mit verschiedenen Kennzahlen und Auswertungen analysiert.

Im Zuge der Verifikation und Validierung werden die Berechnungsmodelle überprüft, ob ihre Ergebnisse plausibel sind und mit realen Werten übereinstimmen. Hierfür werden verschiedene Tests, wie beispielsweise Sensitivitätstests und Grenzwerttests, durchgeführt. Zusätzlich wird die Methodik anhand einer qualitativen Überprüfung der Erfüllung des Anforderungskatalogs mit dem Anwendungsfall des Auftragsfertigers sowie der Beantwortung der Forschungsfragen validiert.

Abschließend werden die wichtigsten Ergebnisse der Forschung zusammengefasst und ein Ausblick auf die Erweiterungsmöglichkeiten der Ergebnisse sowie auf die Eingliederung in zukünftige Entwicklungen gegeben.

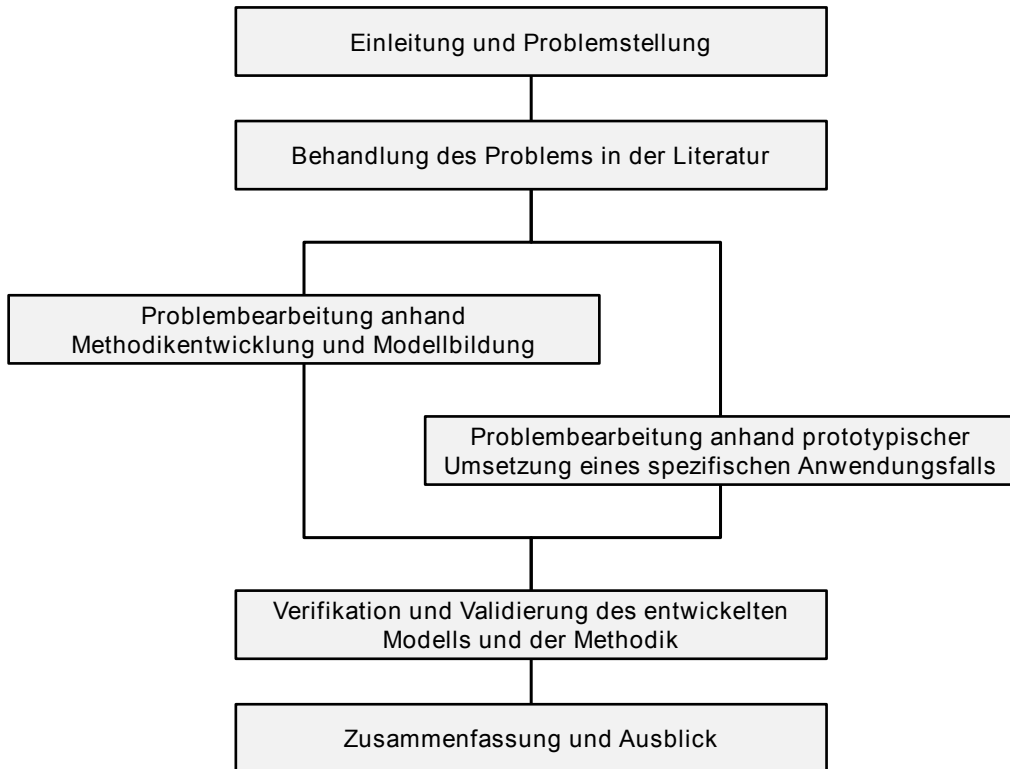


Abb. 1.2: Forschungsdesign (eigene Darstellung in Anlehnung an Ramsauer (2013b, S. 12))

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Vorgehensweise zur Literaturrecherche

In diesem Kapitel werden die Grundlagen hinsichtlich des in der Einleitung eröffneten Forschungsthemas aufbereitet. Zusätzlich wird der Stand der Technik in Bezug auf die spezifischen Herausforderungen dargestellt. Die Basis für den Inhalt dieses Kapitels stellt eine kontinuierliche Literaturrecherche im Zeitraum von April 2012 bis April 2014 dar. Ausgangspunkt der Darstellung der Grundlagen bildet eine entsprechende aktuelle Standardliteratur des betroffenen Hauptfachgebiets der Fabrikplanung. Darüber hinaus wurden folgende Online-Plattformen nach kostenfrei zugänglichen Veröffentlichungen im erwähnten Zeitraum abgefragt:

- ScienceDirect (<http://www.sciencedirect.com/>)
- Scopus (<http://www.scopus.com/>)
- Springer Link (<http://link.springer.com/>)
- Google Scholar (<http://scholar.google.at/>)

Hierbei wurden folgende grundlegende Suchbegriffe oder Keywords verwendet, wobei die Suche sowohl in Deutsch als auch in Englisch durchgeführt wurde. Die Suchbegriffe konnten dabei im angegebenen Zeitraum verfeinert werden. Im Folgenden werden die deutschen Suchbegriffe in einem Überblick wiedergegeben:

- Unsicherheiten in der Fabrikplanung
- Risiko in der Fabrikplanung
- Unsicherheiten im Angebotsprozess
- Risiko im Angebotsprozess
- Quantifizierung von Unsicherheit im Zuge der Fabrikplanung
- Quantifizierung von Unsicherheit im Zuge der Angebotslegung
- Risikomanagement bei Fabrikplanungen
- Risikomanagement bei Angeboten für Auftragsfertigungen
- Korrelierende Unsicherheiten und Risiken

- Modellierung von Planungsunsicherheiten
- Modellierung von korrelierenden Unsicherheiten

Das Suchergebnis wurde sowohl zeitlich nach aktuellen Veröffentlichungen nach 2010 als auch nach technisch-wirtschaftlichen Gesichtspunkten im Hinblick auf Produktion eingegrenzt. Im nächsten Schritt erfolgte die Analyse der Veröffentlichungen anhand der Titel und der Zusammenfassungen. Konnte eine Relevanz für die vorliegende Arbeit festgestellt werden, wurde die gesamte Veröffentlichung bei kostenfreier Verfügbarkeit detailliert betrachtet. Ausgehend von diesen gefundenen Veröffentlichungen wurde die Literaturrecherche anhand der Literaturverweise und Keywords in den Veröffentlichungen ausgedehnt. Hierbei wurde wieder die Vorgehensweise der Relevanzprüfung anhand Titel, Zusammenfassung und Gesamthalt angewendet, wobei die zeitliche Komponente der Verfassung für grundlegende Literaturstellen eine untergeordnete Rolle spielte. Abschließend konnten die gefundenen Veröffentlichungen in Fachgebiete eingeteilt werden. Diese Fachgebiete stellen somit die Basis zur Behandlung der in Kapitel 1.3 gestellten Forschungsfragen dar. Abbildung 2.1 stellt die Vorgehensweise zur Literaturrecherche in einem Überblick dar.

2.2 Überblick über die betroffenen Fachgebiete

Die Fachgebiete, welche die Forschungsarbeit maßgeblich beeinflussen, werden in die vier Themengebiete Fabrikplanung, Angebotslegung, Risikomanagement und statistische Methoden unterteilt, deren gemeinsame Schnittmenge in Abbildung 2.2 schematisch dargestellt wird.

Mit dieser schematischen Darstellung kann gezeigt werden, dass alle vier Fachgebiete eine kleine gemeinsame Schnittmenge besitzen, jedoch außerhalb dieser ein sehr großes Gebiet, das jedoch von dieser Forschungsarbeit nicht berührt wird. Im Kapitel 2 wird eine Übersicht über diese Fachgebiete gegeben, wobei vor allem auf die vorhandenen Methoden und mathematischen Modelle eingegangen wird, die in der Fachliteratur veröffentlicht sind und mit dem Forschungsthema dieser Arbeit in Beziehung stehen. Die restlichen Inhalte der Fachrichtungen werden nur überblicksmäßig dargestellt, um die Eingrenzung zu erleichtern. Für einen detaillierten Einblick muss auf die entsprechende Literatur verwiesen werden, die im Zuge der Darstellung zitiert wird.

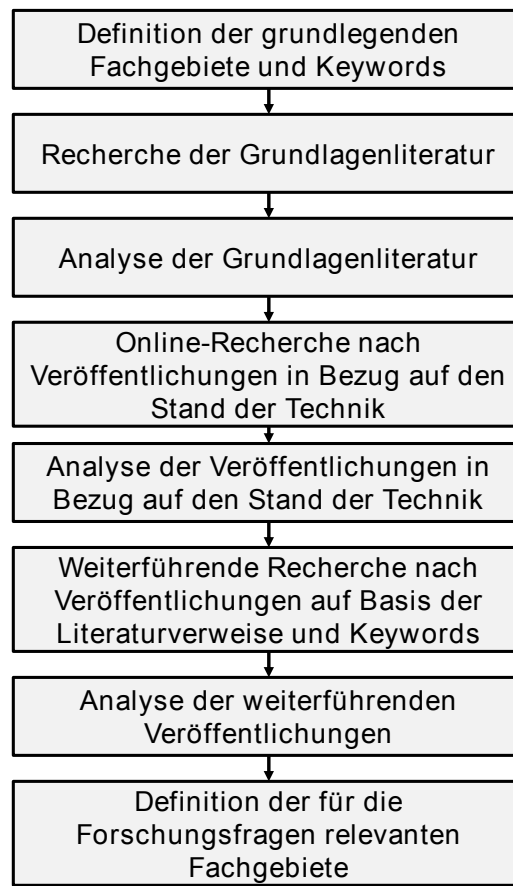


Abb. 2.1: Überblick über die Vorgehensweise zur Erhebung der Grundlagen und des Stands der Technik in Hinblick auf das gegebene Forschungsthema

2.3 Fabrikplanung

2.3.1 Begriffsdefinitionen

Produktionsunternehmen und Fabriken

Der Begriff Produktion wird in der Literatur und in der Praxis nicht einheitlich und für unterschiedliche Sachverhalte verwendet. Es können zum einen materielle Güter und zum anderen auch Dienstleistungen produziert werden. Zusätzlich besteht auch die Möglichkeit, ideelle Güter wie Ideen zu produzieren. Nach Westkämper (2006, S. 24) dient die Produktion nicht nur der Herstellung von Produkten, sondern beinhaltet auch die Betreuung der Produkte über den gesamten Lebenszyklus hinweg. Beginnend bei der Forschung, Entwicklung und Konstruktion über die Herstellung bis zur Nutzung und dem abschließenden Recycling schließt der Begriff Produktion alle Lebensphasen des Produktes mit ein. Die Produktion liefert nach dieser Definition Leistungen in Form von Gütern und Dienstleistungen über den gesamten Lebenszyklus (vgl. Schneeweiß (1987, S. 2)). Im spezifischen

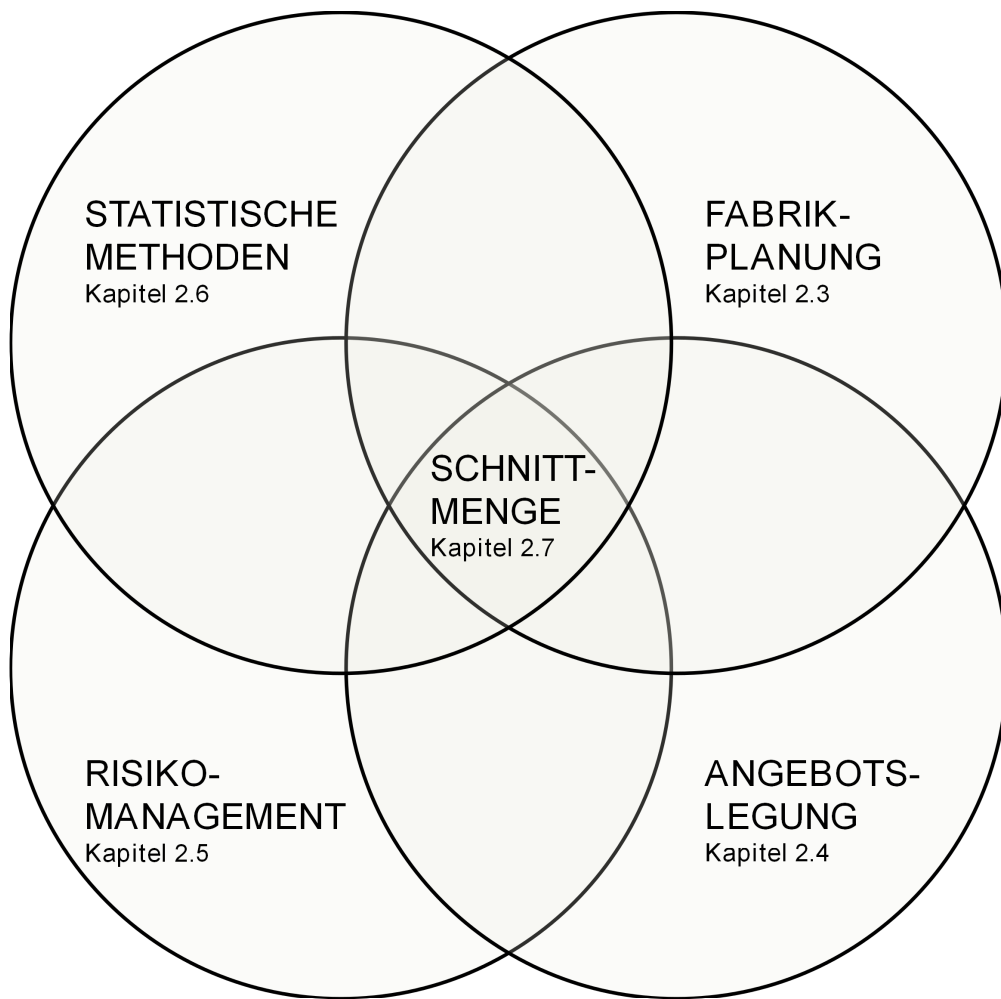


Abb. 2.2: Überschneidung der Fachgebiete Fabrikplanung, Angebotslegung, Risikomanagement und statistische Methoden, die auf eine Methodik zur Quantifizierung von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanungsphase entscheidenden Einfluss haben

definiert der Begriff Fertigung die Herstellung von Produkten. In der vorliegenden Arbeit steht diese Produktion von Produkten im Vordergrund, weshalb die anderen Möglichkeiten nicht weiter betrachtet werden.

Die Aufgabe der Produktion in der vorliegenden Betrachtungsweise besteht somit in der Erzeugung von Produkten. Es zeigt sich hilfreich, die Produktion als System darzustellen, dem man Input zuführt und das Output ausbringt (vgl. Schneeweiß (1987, S. 2 f.)). Der Input wird somit im System der Produktion zu Output transformiert, wie in Abbildung 2.3 für den allgemeinen Fall der Produktion und in Abbildung 2.4 für die alleinige Betrachtung der Herstellung dargestellt ist (vgl. Westkämper (2006, S. 34) und Neumann (1996, S. 1)). Dieser Transformationsprozess kann auch als Wertschöpfung bezeichnet werden, welche auf der Einbringung sogenannter Produktionsfaktoren basiert (vgl. Neumann (1996, S. 1 f.)). Dieser Prozess wird in Gleichung 2.1 definiert. Diese Produktionsfaktoren kön-

nen in gebrauchte Potential- und verbrauchte Repetierfaktoren unterschieden werden (vgl. Schwaiger (2013, S. 18 f.)). Die Potentialfaktoren besitzen die Möglichkeit, das Leistungsvermögen langfristig zur Verfügung zu stellen (vgl. Schwaiger (2013, S. 18 f.) und Neumann (1996, S. 1 f.)). Hierzu zählen die Betriebsmittel und die menschliche Arbeit (vgl. Schwaiger (2013, S. 18 f.)). Repetierfaktoren werden hingegen während des Herstellungsprozesses verbraucht und gehen im Produktionsprozess auf (vgl. Schwaiger (2013, S. 18 f.)). Die Materialien wie Werkstoffe, aber auch die unterschiedlichen Formen der Energie werden dieser Kategorie zugeordnet (vgl. Neumann (1996, S. 1 f.)). Der Begriff Werkstoff zeigt, dass der Produktion Vorprodukte und Rohstoffe zugeführt werden, die ihrerseits schon als Output einer vorgelagerten Produktion bezeichnet werden können. Generell müssen die Produktionsfaktoren am Beschaffungsmarkt von Lieferanten bezogen werden, um sie für den Produktionsprozess zur Verfügung zu haben.

$$\text{Wertschöpfung} = \text{Output} - \text{Input} \quad (2.1)$$

Eine Spezialisierung der Produktionsunternehmen führt in vielen Industriebranchen zu einem komplexen Lieferantennetzwerk, das die Wertschöpfung in Einzelbereiche gliedert und die Produktentstehung auf verschiedene Unternehmen aufteilt (vgl. Westkämper (2006, S. 34)). Der Anteil eines Unternehmens an der gesamten Wertschöpfung, die für ein Produkt notwendig ist, kann dadurch ganz unterschiedlich sein (vgl. Westkämper (2006, S. 34)). Aufgrund von Fremdvergabebetendenzen in der derzeitigen Wirtschaft sinkt jedoch der Eigenleistungsanteil laufend (vgl. Westkämper (2006, S. 34)). Produktionsstätten, die Teil eines Unternehmens sind, spezialisieren sich oftmals auf einen spezifischen Wertschöpfungsanteil (vgl. Westkämper (2006, S. 34)). Durch einen zielgerichteten Einsatz der Produktionsfaktoren kann dieser Wertschöpfungsanteil dann geleistet werden (vgl. Schwaiger (2013, S. 19)).

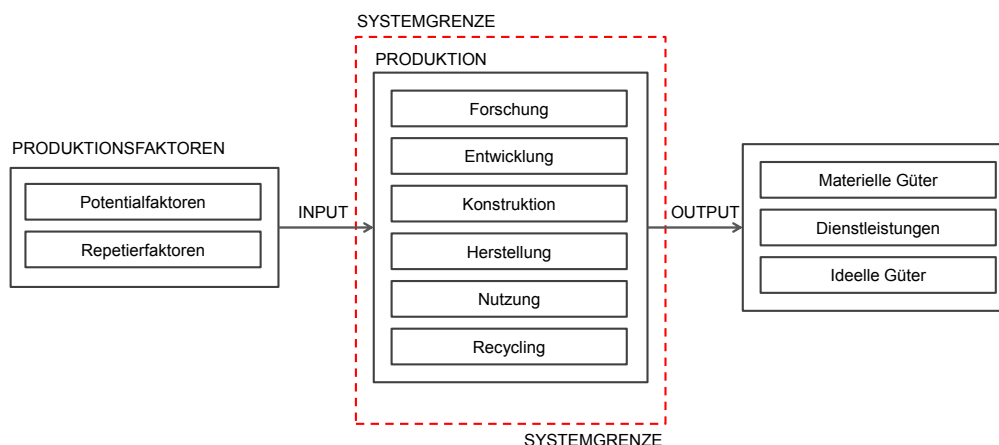


Abb. 2.3: Darstellung der Transformation von Input zu Output durch Produktion (eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper (2006, S. 34) und Neumann (1996, S. 1))

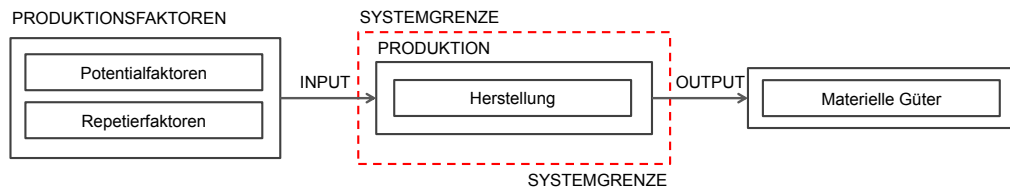


Abb. 2.4: Darstellung der Transformation von Input zu Output durch die Herstellung als Teil der Produktion (eigene Darstellung in Anlehnung an Westkämper (2006, S. 34) und Neumann (1996, S. 1))

Ein Produktionsunternehmen kann als Unternehmen definiert werden, in dem technische und organisatorische Prozesse ablaufen, die der Herstellung, dem Erhalt und dem Recycling von Produkten und Leistungen dienen (vgl. Westkämper (2006, S. 24)). Eine Fabrik wird dabei als eine Einheit betrachtet, die einen gewissen Wertschöpfungsanteil auf einem abgegrenzten örtlichen Bereich leistet (vgl. Westkämper (2006, S. 24)). Der Einsatz von Produktionsfaktoren wird also örtlich gebündelt (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 33)). Das grundsätzliche Ziel eines Produktionsunternehmens ist, unter Einhaltung der staatlichen Gesetze und Vorschriften sowie der für sie gültigen technischen Regelwerke und Richtlinien wirtschaftlich zu agieren. (vgl. Westkämper (2006, S. 72 ff.)). Wiendahl fordert in diesem Zusammenhang als primäres Ziel höchste Wirtschaftlichkeit von Fabriken (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. V)). Wirtschaftlichkeit wird als das Verhältnis des Ertrages zum Aufwand definiert (vgl. Thommen & Achleitner (2003, S. 105)). Die Haupteinflüsse auf die Wirtschaftlichkeit können anhand der Analysemöglichkeit der fünf grundlegenden Wettbewerbskräfte nach Porter (2008, S. 36) analysiert werden, wie in Abbildung 2.5 ersichtlich ist. Ein Produktionsunternehmen steht hierbei immer im Spannungsfeld der Verhandlung mit seinen Lieferanten bezüglich der Produktionsfaktoren und mit seinen Abnehmern bezüglich der erzeugten Güter. Dazwischen liegt das Gebiet der Wertschöpfung, in dem sich auch die Konkurrenten befinden, mit denen das Unternehmen bezüglich des Marktes im Wettbewerb steht. Zusätzliche Kräfte von außen stellen Ersatzprodukte und potentielle neue Konkurrenten dar.

Anhand der fünf Kräfte nach Porter (2008, S. 36) kann ein Ziel dieser Arbeit detailliert werden. Durch eine frühe Fabrikplanung von Produkten, die eine Quantifizierung der Unsicherheiten ermöglicht, sollen Informationen gewonnen werden, die Preisentscheidungen im Zuge der Angebotslegung an den Abnehmer erleichtern sollen.

Fabrik- und Produktionsplanung

Buzacott et al. (2013, S. 1 ff.) definiert Planung als eine systematische Vorbereitung auf zukünftige Tätigkeiten. Die Planung basiert hierbei auf Annahmen und Zukunftsprognosen über das zu planende Objekt und die Entwicklung von dessen Umwelt. Zentrale Kriterien von Planungen bestehen in der Zukunfts-, Ergebnis- und Objektivitätsorientie-

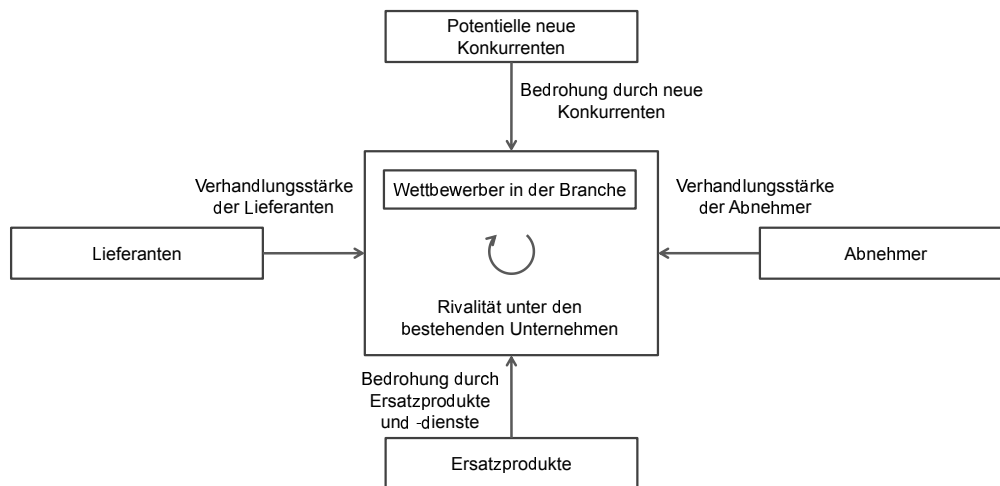


Abb. 2.5: Darstellung der fünf grundlegenden Wettbewerbskräfte nach Porter (2008, S. 36)

Planungen betreffen also die Zukunft, sollen zu einem Ergebnis führen und eine möglichst objektive Betrachtung der Sachverhalte implizieren. Eine Betrachtung zukünftiger Aktivitäten impliziert dabei eine nicht vollständige Daten- und Informationsbasis, die Unsicherheiten in der Planung auslösen. Dennoch werden Planungen durchgeführt, um Ergebnisse für die bewusste Vorausplanung von zukünftigen Tätigkeiten zu erhalten. Aufgrund der Unsicherheit der Zukunft werden Alternativen im Zuge dieser Planung gesucht, um durch einen Auswahlprozess eine bestmögliche Lösung zu finden. Das Ergebnis davon kann anhand von quantitativen und qualitativen Zielen bewertet werden, wobei Abweichungen wiederum nachfolgende Tätigkeiten auslösen. Quantitative Ziele können dabei anhand von zählbaren Mengenangaben bewertet werden, während qualitative Ziele eine Beurteilung der beteiligten Personen beinhalten. (vgl. Buzacott et al. (2013, S. 1 ff.))

Um komplexe Planungsaufgaben bewältigen zu können, ist es zielführend, diese in Subaufgaben und Teilplanungen zu unterteilen, wobei üblicherweise organisatorische Gesichtspunkte für die Aufteilung ausschlaggebend sind (vgl. Buzacott et al. (2013, S. 1)). Die Teile können nach Planungsphase und Unternehmensbereiche willkürlich unterschieden werden (vgl. Buzacott et al. (2013, S.1 f.) und Westkämper (2006, S. 51 f.)). Es muss jedoch beachtet werden, dass mit jeder Unterteilung eine Schnittstelle geschaffen wird, die eine zusätzliche Herausforderung bei der Planung ergibt und eine Schwachstelle beim Datentransfer hinsichtlich Qualität und Transparenz darstellt (vgl. Buzacott et al. (2013, S.1 f.), Bracht et al. (2011, S. 257 f.) und Westkämper (2006, S. 51 f.)). Gerade diese Schnittstelle erfordert eine kontinuierliche Kommunikation der betroffenen Planer. Erfolgt die Planung parallel, muss diese ebenfalls immer an den aktuellen Planungsstand, der die Schnittstelle betrifft, angepasst werden. Läuft die Planung seriell, dann ist genau zu definieren, welche Informationen die vorangegangene Planung abzuliefern hat, um den darauffolgenden Schritt zu ermöglichen. Im Zuge einer Konsolidierungsphase werden Planungen aggregiert und für Entscheidungen zusammengefasst, die bei einer Fülle

an Informationen sonst schwierig zu treffen sind (vgl. Buzacott et al. (2013, S. 17)).

Die Planung einer Gesamtfabrik stellt ein komplexes, mehrschichtig strukturiertes Aufgabenfeld dar und bindet viele verschiedene Gesichtspunkte und Planungsabteilungen mit ein (vgl. März & Weigert (2011, S. 7)). Sie umfasst die Arbeit von Architekten, Bauingenieuren, Prozessplanern, Logistikplanern und vielen mehr (vgl. Bracht et al. (2011, S. 258 f.)). Je Interessensgruppe werden unterschiedliche Ziele verfolgt, die zu anderen Schnittstellen und Zielkonflikten führen. Im Zuge der Fabrikplanung gilt es unter Berücksichtigung spezifischer Randbedingungen ein Gesamtoptimum anzustreben, wobei dies eine Priorisierung der Ziele mit sich führt (vgl. Pawellek (2008, S. 13)). Viele dieser Unterbereiche besitzen ihre spezialisierten Planungswerkzeuge und Detailanforderungen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 258 f.)). Eine besondere Herausforderung besteht in der Zusammenführung der unterschiedlichen Planungen und Planungsdaten (vgl. Bracht et al. (2011, S. 258 f.)).

Grundsätzlich kommen für eine Fabrikplanung die Projekttypen Neuplanung, Erweiterung und Reorganisation in Betracht, wie in Abbildung 2.6 dargestellt ist (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 427)).



Abb. 2.6: Die Projekttypen der Fabrikplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Wiendahl et al. (2009, S. 427))

Ein spezifischer Fall der Fabrikplanung ist die Planung von Produktionsstätten, bei denen der Wert der Anlagen und Einrichtungen den Gesamtwert in einem hohen Maß dominiert. Die Fabrikhalle kann in einem solchen Fall als schützende Hülle betrachtet werden. Je nach Planungsfall muss entschieden werden, inwieweit die Fabrikhalle für sich im Detail betrachtet wird oder ob lediglich die Anforderungen an die Infrastruktur festgehalten werden. Vor allem bei Großanlagen, wie zum Beispiel Walzwerke, Presswerke, Lackierereien und Montagelinien von Automobilen, ist dies häufig der Fall. (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 487))

Die Produktionsplanung legt den Fokus der Tätigkeiten auf die Planung wertschöpfender Prozesse, sie ist somit eine Teilplanung im Rahmen der Fabrikplanung (vgl. Buzacott et al. (2013, S. 3 f.) und Bracht et al. (2011, S. 33 f.)). Hier werden die Produkte und

die Produktionsprozesse in entsprechender Tiefe geplant, wobei alle Tätigkeiten vor Produktionsstart beinhaltet sind (vgl. Bracht et al. (2011, S. 33 f.) und Spur (2001, S. 509)). Produktionssteuerung findet hingegen während der laufenden Produktion statt und hat das Ziel, geeignete Mittel zu finden, um Abweichungen zwischen der geplanten und der realen Produktion zu beseitigen (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 270 f.)). Diese Planabweichungen können vielfach mit den Unsicherheiten im Zuge der Planung begründet werden, die ihre Auswirkungen in der Umsetzung zeigen (vgl. Buzacott et al. (2013, S. 4)). In der Produktionsplanung werden also Produktionsprozesse unter Berücksichtigung definierter Produktions- und Produktbedingungen festgelegt, wobei vielfach verschiedene Planungsalternativen erstellt, analysiert und bewertet werden (Bracht et al. (2011, S. 34)). Im Zuge dieser Planung werden Produktionsprogramm und -bedarf sowie die Grenze zwischen Eigenfertigung und Fremdbezug detailliert betrachtet (Wiendahl et al. (2009, S. 271)). Auf Basis von Absatzprognosen mit unterschiedlich langen Planungshorizonten werden die Produktionsprogramme erstellt und wird der jeweils notwendige Bedarf festgelegt (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 271)). Nach dem zeitlichen Kriterium wird bei der Produktionsplanung zwischen einer strategischen, taktischen und operativen unterschieden (vgl. März & Weigert (2011, S. 7)). Während bei der strategischen Planung die Ausrichtung von Produkt- und Produktionskonzept im Vordergrund steht und die taktische die Festlegung der notwendigen Kapazitäten der Produktionsfaktoren zur Aufgabe hat, legt die operative Planung einen optimalen Einsatz der Produktionsmittel fest (vgl. März & Weigert (2011, S. 7)).

2.3.2 Phasen der Fabrikplanung

Im Zuge der Unterteilung der Fabrikplanung in Teilplanungen wird in der Literatur vielfach eine zeitliche Phaseneinteilung gewählt, wobei diese nicht einheitlich ist. Trotz der unterschiedlichen Anforderungen je Projekttyp der Fabrikplanung werden die Phasen übergreifend bestimmt (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 427)). Grundig (2013, S. 37 ff.) kombiniert die grundlegenden Veröffentlichungen und definiert die fünf übergreifenden Schritte Vorbereitung, Strukturplanung, Detailplanung, Ausführungsplanung, Ausführung, wie in Kapitel 1.1 beschrieben wird. Nachfolgende Planungsphasen basieren dabei im Regelfall auf den vorangegangenen und führen die Planung zu einem detaillierteren Stand (vgl. Grundig (2013, S. 37 ff.)). Dadurch steigt auch mit fortschreitender Planung deren Umfang und steigen die Kosten. Je früher man sich in der Planung befindet, desto mehr wird auf das grundlegende Konzept der Umsetzung und damit auf die Kosten der Umsetzung Einfluss genommen, wie aus Abbildung 2.7 ersichtlich ist (vgl. Pawellek (2008, S. 53) und Anderson (1990, S. 6)). Gerade dadurch kommt einer frühen Planungsphase, die in der vorliegenden Arbeit auf die Schritte Vorbereitung und Strukturplanung eingeschränkt wird, eine besondere Bedeutung bei. Zu beachten ist jedoch, dass auch schon im Zuge der Produktentwicklung ein Großteil der Kosten festgelegt wird, der in der Abbildung 2.7

keinen Eingang findet (vgl. Anderson (1990, S. 6)). Der Prozentsatz der festgelegten Kosten aus Abbildung 2.7 definiert also nur diejenigen Kosten zwischen 0 und 100 Prozent, die von der Fabrikplanung beeinflussbar sind.

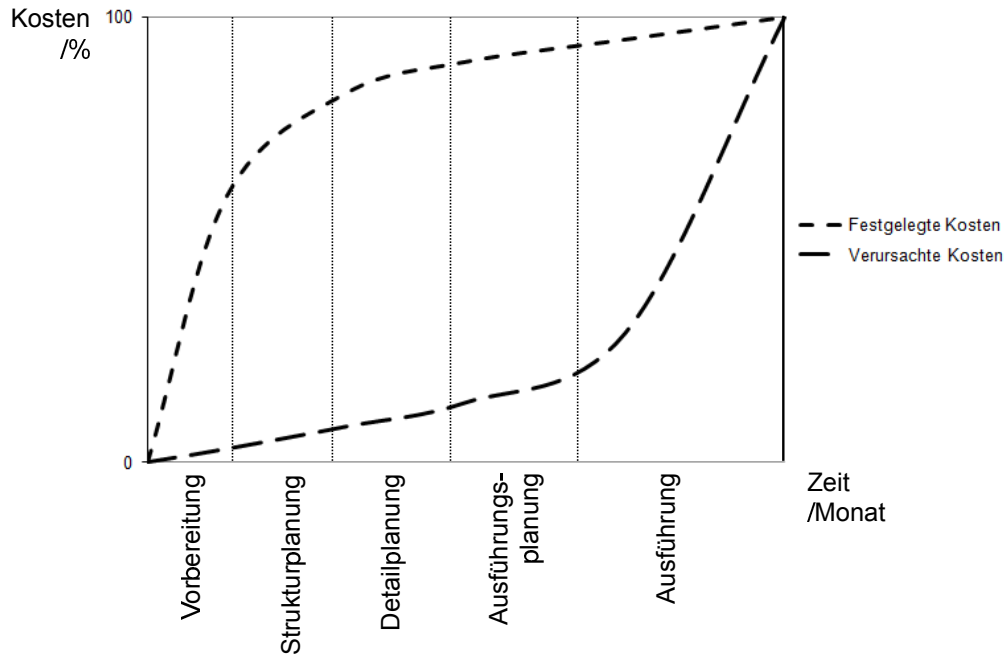


Abb. 2.7: Darstellung der festgelegten und verursachten Kosten im Zuge der Fabrikplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Pawellek (2008, S. 53) und Anderson (1990, S. 6))

Beginnend von einer Analyse und Detaillierung der Aufgabenstellung im Zuge der Vorbereitung werden an dieser Stelle erste Konzepte zur Lösungsfindung getroffen (vgl. Grundig (2013, S. 37 ff.) und Wiendahl et al. (2009, S. 426 f.)). Während der Grobplanung als Teil der Strukturplanung werden dann Lösungskonzepte und real umsetzbare Lösungsalternativen ausgearbeitet (vgl. Grundig (2013, S. 37 ff.)). Als Abschluss dieser Phase kann die Entscheidung für eine Lösungsalternative herangezogen werden, die dann im Zuge der Detailplanung als Ideal- und Realsystem mit verschiedenen Methoden und Werkzeugen umfassend ausgearbeitet wird. Mit der Ausführungsplanung wird die direkte Umsetzung der Produktion eingeleitet und alle notwendigen Daten und Unterlagen für die tatsächliche Produktion vorbereitet (vgl. Grundig (2013, S. 37 ff.)). Im Zuge der abschließenden Ausführung wird das Projekt realisiert. An dieser Stelle wird auf die entsprechende Grundlagenliteratur und Normen verwiesen, die eine differenzierte und ausführliche Beschreibung der Planungsinhalte bieten. (vgl. Grundig (2013, S. 37 ff.), Bracht et al. (2011, S. 25 ff.), Wiendahl et al. (2009, S. 417 ff.), Pawellek (2008, S. 50 ff.), Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2011b) und Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008))

2.3.3 Fabrikplanung mithilfe der Werkzeuge der Digitalen Fabrik

Die Definition der Digitalen Fabrik ist in der Literatur nicht einheitlich wiederzufinden. Ein historischer Abriss dazu kann bei Bracht et al. (2011, S. 9 ff.) nachgelesen werden. Mit der Richtlinie VDI4499 wird versucht, einen für alle Branchen einheitlichen Begriff für die Digitale Fabrik zu prägen, dem sich auch diese Arbeit anschließt. Diese Richtlinie definiert das Ziel der Digitalen Fabrik als eine „[...] ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt“ (Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S. 3)) mithilfe eines umfassenden Netzwerks von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen. Ein durchgängiges Datenmanagement soll hierbei die Integration der unterschiedlichen Bestandteile des Netzwerks ermöglichen (Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S. 3 f.)). Nachdem aufgrund der Komplexität der Gesamtaufgabe jedes Werkzeug ein Teilsystem der Fabrikplanung darstellt, bietet die Integration besondere Herausforderungen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 15 ff.)). Die Daten müssen über die Schnittstellen der einzelnen Phasen transferierbar und zwischen den organisatorischen Teilsystemen, die oft ganz unterschiedliche Methoden planen, austauschbar sein, sowie über verschiedene Granularitätsstufen aggregierbar sein (vgl. Bracht et al. (2011, S. 19)). Betrachtet man die vielfältigen Prozessschritte in Abbildung 2.8, die innerhalb der Digitalen Fabrik vereint werden und vom Produktentwurf über die Fabrikplanung und Produktion bis zum Vertrieb und Recycling führen, dann zeigt sich die Tragweite dieser Forderung. Gerade in jeder Einzeldisziplin existieren oft etablierte Planungsmethoden mit Informationstechnologie-Unterstützung als Insellösungen, die in einer abgeschlossenen Betrachtung schon alleine sehr komplex sind (vgl. Bracht et al. (2011, S. 19)). Die Integration dieser Methoden in eine ganzheitliche Fabrikplanung gilt somit als Leitthema der nächsten Jahre (Pawellek (2008, S. 311 ff.) und Ramsauer (2013a, S. 6 ff.)).

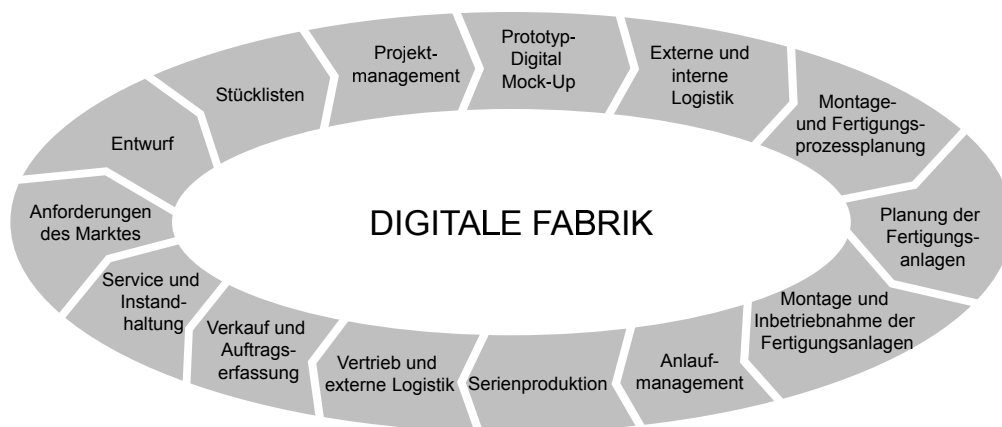


Abb. 2.8: Darstellung der Prozessschritte der Digitalen Fabrik (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S.5))

Ein grundlegendes Modell, das ein Grundgerüst für Digitale Fabrik bildet, wird als

Produkt-, Prozess-, und Ressourcenmodell (PPR-Modell) bezeichnet (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008) und Bracht et al. (2011, 382)). Ziel der Digitalen Fabrik ist hierbei wieder ein integriertes PPR-Modell (vgl. Pawellek (2008, S. 312)). Ausgehend von den Produktdaten, die im Zuge der Produktentstehung erzeugt werden, erfolgt die Planung der Produktionsprozesse und dann die Auswahl und Zuteilung der für die Prozesse notwendigen Ressourcen oder Produktionsfaktoren. Die drei beschriebenen Größen besitzen Wechselwirkungen zueinander, die bidirektional wirken können (vgl. März & Weigert (2011, S. 9)). Durch die Integration kann die Entwicklung direkt mit der Fabrikplanung verbunden und können Datenschnittstellen reduziert werden. Trotz dieses Ansatzes werden immer noch Schnittstellen zwischen den beteiligten Personen bestehen bleiben. Bei kurzen Produktlebenszyklen mit vielen Produktvarianten birgt die direkte Anbindung der Produktionsdaten an die Daten der Produktentstehung Vorteile, da die Probleme an den Schnittstellen, wie beispielsweise geeignete Datenformate für verschiedene Systeme, verringert werden. Ebenfalls werden Rückmeldungen von der Ausführung der Produktion an die Fabrikplanung und Produktentwicklung aufgrund der direkten Möglichkeit zur Zuordnung der umgesetzten Fabrik zu den Ressourcen-, Prozess- und Produktdaten wesentlich erleichtert.

Die Informationen der Produktdefinition werden in der Norm EN 62264 in die drei Bereiche Produktherstellungsvorschriften, Ressourcenliste und Materialliste eingeteilt und deren Schnittmenge definiert, wie in Abbildung 2.9 ersichtlich ist. Die Produktinformationen aus dem PPR-Modell befinden sich nach dieser Definition in den Produktherstellungsvorschriften, die alle Informationen beinhalten, die für die Produktion des spezifischen Produktes notwendig sind, und in der Materialliste, in der sich die Materialinformationen für das Produkt befinden, wobei in dieser mehr Information berücksichtigt wird, als für die Produktion relevant ist. Die Ressourcenliste beinhaltet alle Informationen über die Faktoren, die für die Produktion notwendig sind. Die Produktionsprozessinformationen werden in diesem Modell im ersten Schritt nicht mit abgebildet. Die Auslegung der Produktionsprozesse kann als Zwischenschritt in der Planung betrachtet werden, um als Output die notwendigen Ressourcen zu eruieren. Zusätzlich bietet dieses Modell das Potential, die Schnittmengen zwischen den drei Informationsbereichen darzustellen. Diese Schnittmengen werden als Produktsegmente bezeichnet. Die gesamte Materialliste stellt einen Teil der Ressourcenliste dar. Somit existieren die Produktsegmente der Schnittmenge von den Produktherstellungsvorschriften und der Ressourcenliste, sowie von den Produktherstellungsvorschriften und der Materialliste. Dieses Produktsegment repräsentiert einen Teil der Gesamtproduktion, in dem mit spezifischen Ressourcen anhand eines Teils der Produktherstellungsvorschriften ein definierter Prozessschritt ausgeführt wird. Es können mit diesem Modell verschiedene Aggregationsstufen aller für die Produktion relevanter Prozessschritte abgebildet werden. Zusammengefasst bietet dieses Modell die Informationen des PPR-Modells mit der spezifischen Sicht auf die Schnittstellen der relevanten Informationen. (vgl. OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik (2008, S.

38 f.))

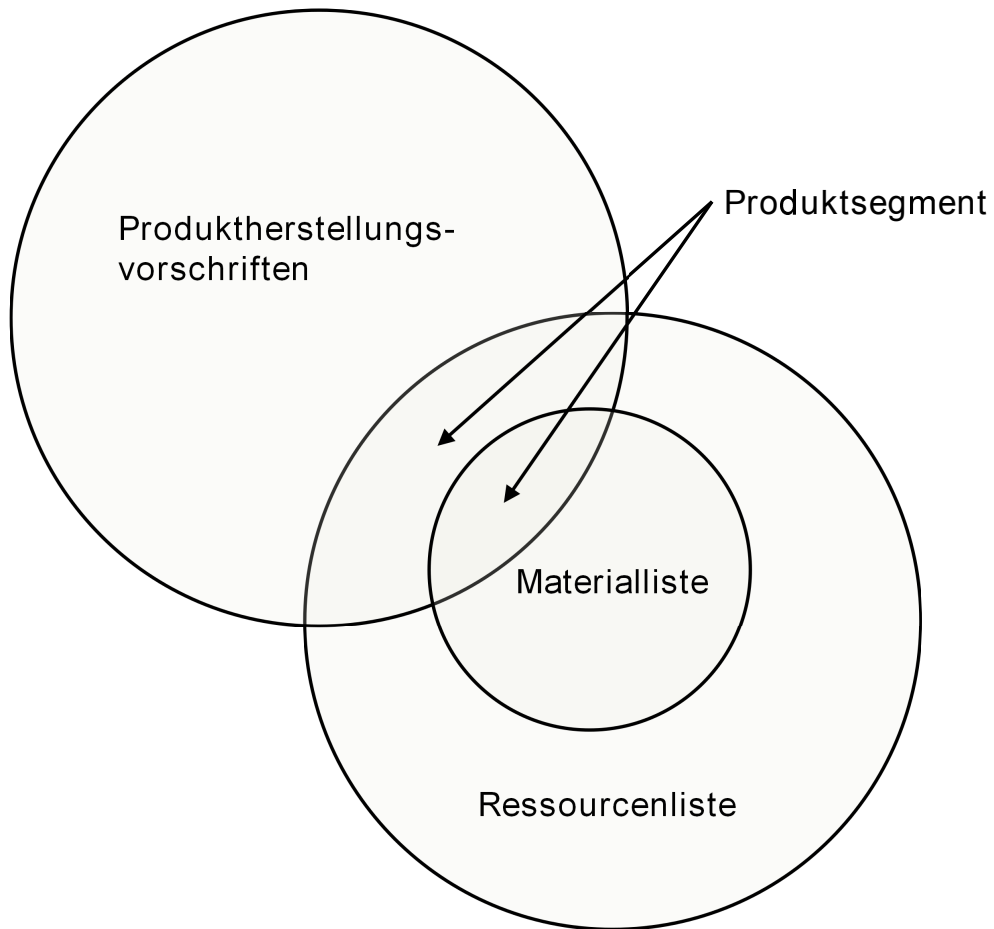


Abb. 2.9: Informationen der Produktdefinition für die Produktion (OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik (2008, S. 38))

2.3.4 Modell-, Methoden- und Methodikbegriff

Modellbegriff

Der Modellbegriff wird im Zuge wissenschaftlicher Arbeiten häufig verwendet. Allgemein wird das Modell als Abbild der Wirklichkeit unter der Einschränkung von Annahmen und Vernachlässigungen definiert (vgl. Bracht et al. (2011, S. 79) und Bronstein et al. (2000, S. 804)). Die Richtlinie VDI3633 versteht unter einem Modell „eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder real existierenden Originalsystems mit seinen Prozessen“ (Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2010, S. 5)). Hierfür wird ein Toleranzrahmen definiert, in dem sich die Eigenschaften bewegen, die im Zentrum der Untersuchungen stehen. Die Modelle verfolgen also einen Zweck und sind für eine bestimmte Aufgabe oder Problemstellung geschaffen (Wiendahl (2011, S. 29)). Von entscheidender Bedeutung

ist die Wahl des Detaillierungsgrades des Modells (vgl. Rose & März (2011, S. 17)). Es gilt, eine Kompromisslösung zwischen sehr detaillierten Modellen, die zwar viele Komponenten der Realität enthalten, aber einen hohen Aufwand bei der Erstellung und Pflege verursachen, und sehr einfachen Modellen zu finden, die die Realität eher grob abbilden und aufgrund von getroffenen Vereinfachungen nicht alle Zusammenhänge wiedergeben. Stachowiak (1973, S. 128 ff.) prägte den Modellbegriff anhand von den drei Hauptmerkmalen Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal. Erstens werden Modelle definiert, damit sie Originale beziehungsweise abbilden. Zweitens werden durch die Modelle nicht alle Attribute erfasst, sondern nur solche, die dem Modellentwickler als relevant erscheinen. Das Original wird somit abstrahiert abgebildet (vgl. Rose & März (2011, S. 13)). Und drittens ersetzen die Modelle das Original nur für bestimmte Anwender in einer bestimmten Zeit für eine bestimmte Anwendung. In Abbildung 2.10 werden die Merkmale in einem Überblick dargestellt.

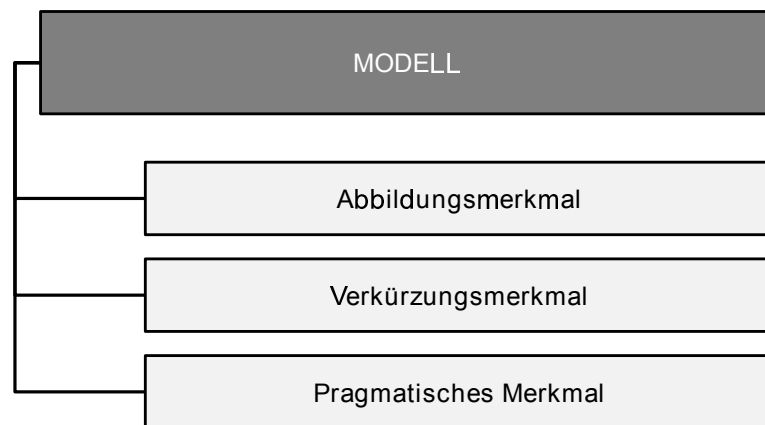


Abb. 2.10: Merkmale eines Modells (eigene Darstellung in Anlehnung an Stachowiak (1973, S. 128 ff.))

Für Fabrikplaner der unterschiedlichen Bereiche existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen Modellen, die laufend weiterentwickelt und um zusätzliche ergänzt werden. Ganz spezifische Anwendungsfälle erfordern oft speziell entwickelte Modelle, die ihren Einsatz nur im Zuge einer einzigen Anwendung finden. Anhand eines Modells können durch Simulation Experimente durchgeführt werden, die in vielen Fällen Entscheidungsprozesse unterstützen, indem verschiedene Alternativen durch die Simulation mit dem Modell berechnet werden (vgl. Rose & März (2011, S. 13)). Bronstein et al. (2000, S. 804) definieren die Simulation als „die Untersuchung eines Prozesses oder Systems mithilfe eines Ersatzsystems“. Ein mathematisches Modell, das als Beschreibung des Systems dient, wird in der Regel als Ersatzsystem verwendet. Mit verschiedenen Verfahren können ebenfalls Optimierungen von definierten Zielparametern ermittelt werden, die bei mehreren Zielen, wie in der Produktion oftmals der Fall, zu Kompromisslösungen führen (vgl. Krug & Rose (2011, S. 21)). Bei Optimierungen werden bestmögliche Resultate beziehungsweise bestmögliche Kompromisse angestrebt (vgl. März & Weigert (2011, S.

11)).

Methode und Methodik

Der Begriff Methode wird in der Literatur nicht immer eindeutig verwendet (vgl. Bracht et al. (2011, S. 82)). Vielfach steht die Methode in Zusammenhang mit der Verwendung eines Werkzeugs oder Modells und deren auf- und ablauforganisatorischer Fragestellungen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 81)). Für diese Arbeit wird folgende Definition verwendet. Die Methode stellt ein „auf ein Regelwerk aufbauendes Verfahren zur Erlangung von [...] praktischen Ergebnissen“ (Bibliographisches Institut GmbH (2013a)) dar. Für die Methodik wiederum existiert in derselben Quelle unter anderem die Definition einer „festgelegten Art des Vorgehens“ (Bibliographisches Institut GmbH (2013b)), die ebenfalls als Vorlage für diese Arbeit dient. Ein Werkzeug oder Modell kann somit in eine Methode oder Methodik implementiert sein, wobei die Methodik den Umgang mit diesem und das Vorgehen beschreibt (vgl. Bracht et al. (2011, S. 83)).

2.3.5 Fabrikplanung und der Produktentstehungsprozess

Es bestehen gravierende Wechselwirkungen zwischen dem Produkt, dem Produktionsprozess und den Produktionsfaktoren, wie in Kapitel 2.3.3 anhand des PPR-Modells beschrieben wird. Anhand detaillierter Produktinformationen wird maßgeblich beeinflusst, in welcher Weise ein Produkt erzeugt werden kann und anhand der existierenden Produktionsfaktoren und -prozesse wird definiert, mit welchen Kosten und welcher Qualität in welcher Zeit die Produktion erfolgt. Simultaneous Engineering Ansätze im Zuge der Produktentstehung fördern zusätzlich eine Parallelisierung der Entwicklungs- und Planungstätigkeiten zur Reduktion der Produktentwicklungszeit. Die Fabrikplanung wird dabei zu einem frühen Zeitpunkt in die Produktentstehung mit einbezogen. Neben der zeitlichen Beschleunigung wird dadurch auch eine verstärkte Kommunikation der beteiligten Bereiche erwirkt. (vgl. Westkämper (2006, S. 137))

Werden Fabriken für Produkte geplant, die nicht vollständig entwickelt sind, fehlen zu diesem frühen Zeitpunkt detaillierte Produktinformationen, die für eine Planung der Fabrik notwendig sind. Gerade in der frühen Phase der Produktentwicklung wird der Lösungsraum möglichst offen gehalten, um Platz für Produktinnovationen zu schaffen. Eine Integration von Fabrikplanern bietet hierbei den Vorteil, frühzeitig die Herstellbarkeit der Lösungsvorschläge zu analysieren. Aufgrund zeitlicher Limitationen bis zur Umsetzung der Produktion existieren jedoch Mindestanforderungen von Seiten der Fabrikplanung, welche die Voraussetzung für Planungstätigkeiten bilden. Dennoch existieren in dieser

Phase Unsicherheiten in vielfältiger Form. Unsichere Marktprognosen, unklare Produktmerkmale, neue Produktionstechniken bieten Platz für viele Unklarheiten. Gerade in diesem Zeitraum können jedoch Produkteigenschaften entschieden definiert werden, die die Herstellungskosten maßgeblich beeinflussen. Fehler, die an dieser Stelle frühzeitig erkannt werden, verursachen vergleichsweise geringe Kosten, während diese bei später Erkennung erheblich höhere Kosten zur Behebung generieren. (vgl. Westkämper (2006, S. 121 ff.))

2.3.6 Herausforderung im Zuge der frühen Fabrikplanung

Eine Besonderheit im Zuge der Fabrikplanung stellt ihre frühe Phase dar. Zum einen werden in diesem Abschnitt erhebliche Kosten der Produktion festgelegt, wobei oftmals Unsicherheiten bezüglich Detailinformationen des Produktes und der Produktion vorhanden sind. Zum anderen ist diese Phase durch begrenzte Zeit sowie begrenzten Einsatz von Ressourcen gekennzeichnet. Betrachtet man die Fabrikplanung als Projekt, so trifft das Beschreibungsmodell des Steuerungsdreiecks aus dem Projektmanagement zu. Durch die drei Größen Zeit, Kosten und Qualität wird der Projektoutput maßgeblich beeinflusst (vgl. Kuster et al. (2011, S. 72 f.)). Im Fall der frühen Fabrikplanung besteht der Output aus der Dimensionierung der Flächen, des Personals und der Betriebsmittel (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 463 f.)). Auch in dieser Phase stehen dem Planungsprojekt nur begrenzte Ressourcen in Form von Planungsexperten zur Verfügung, die die erforderliche Qualität in einer vorgegebenen Zeit schaffen sollen. Zusätzlich muss mit den erwähnten Unsicherheiten umgegangen werden können. Aufgrund der begrenzten Planungstätigkeiten treten somit weitere Unsicherheiten innerhalb dieser Planung auf.

Generell werden in dieser Phase bei allen Fabrikplanungsprojekttypen (Neuplanungen, Erweiterungen oder Reorganisationen) sowohl wertschöpfende als auch nicht-wertschöpfende Tätigkeiten betrachtet. Ziel ist ein grobes Konzept, das die Hauptpunkte der Produktion regelt. Vor allem beim Planen von Fabriken mit einem hohen Anlagewert, wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben wird, reduziert sich die Planungstätigkeit der Fabrik auf eine reine Planung des Flächenbedarfs mit einer groben Unterteilung, die die Anforderungen an die Infrastruktur definiert (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 487)). Dennoch spricht man in diesem Zusammenhang von einer Fabrikplanung und nicht Produktionsplanung, da auch nicht-wertschöpfende Tätigkeiten geplant werden.

Im Zuge dieser Phase wird die Umsetzung eines Produktes in der Produktion zum ersten Mal ganzheitlich im Laufe der Produktentstehung betrachtet. Es wird das grundlegende Konzept der Umsetzung erarbeitet und werden Lösungen für besondere Herausforderungen eruiert. Aufgrund der zukünftigen Kosten, die hierbei fixiert werden, besteht die Anforderung an einen reibungsfreien Informationsaustausch der Produktion mit der Produktentwicklung. Ein durchgängiges Informationsdatensystem, das die Digitale Fabrik mit

dem integrierten Produkt-, Prozess-, Ressourcenmodell in den Mittelpunkt ihres Interesses stellt, bietet vor allem hier die ersten Vorteile. Neben der Datenübergabemöglichkeit ist die Kommunikation der beteiligten Entwickler und Planer gefordert, um im Hinblick auf ein Gesamtkostenoptimum Veränderungen am Produkt oder in der Fabrikplanung vornehmen zu können.

In vielen Disziplinen wird die frühe Planungsphase durch für das Unternehmen beziehungsweise für Industrien spezifisch entwickelte Werkzeuge und Methoden unterstützt, die oftmals keine detaillierte Beschreibung in der Literatur finden (vgl. Chou (2011, S. 706)). Gefordert ist neben der Schnelligkeit der Ausarbeitung auch eine Flexibilität bezüglich möglicher laufender Änderungen und auch spezieller Innovationen.

Zusammenfassung der für diese Arbeit bedeutenden Literatur der Fabrikplanung

Die vorliegende Arbeit baut im Fachgebiet der Fabrikplanung vor allem auf den Grundlagen von Buzacott et al. (2013), Bracht et al. (2011), Wiendahl et al. (2009) und Westkämper (2006) auf. Weiters bildet die Norm VDI 4499 (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008) und Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2011a)) einen wichtigen Ausgangspunkt der Arbeiten. Die Modelldefinition nach Stachowiak (1973) stellt ebenfalls ein zentrales Element für die Modellentwicklung in Kapitel 3 dar. Im Zuge der Beschreibung der weiteren Fachgebiete und deren Zusammenhänge wird das Gebiet immer enger eingegrenzt und der Stand der Technik schlussendlich für diese Detaildisziplin erhoben.

2.4 Angebotslegung

Der Prozess der Angebotslegung ist laut einer Studie des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) zum Angebotsmanagement überwiegend ein gewachsener Prozess ohne systematische Verfahren zur Entwicklung und Optimierung (vgl. Schmidt (2008, S. 5)). Zahlreiche Beispiel- und Referenzprozesse wurden in verschiedenen Arbeiten und Richtlinien erstellt (vgl. beispielsweise Erichsen & Riederer (2014, S. 21 f.), Schuh et al. (2008, S. 32) und Staud (2006, S. 21 ff.)). Die übergeordneten Prozessschritte der Angebotserstellung können im Zuge dieser Arbeit zusammengefasst werden, wie in Abbildung 2.11 dargestellt wird.

Nach Eingang einer Kundenanfrage wird intern geprüft, ob alle notwendigen Informationen für ein Angebot vorhanden sind und ob ein Angebot gestellt wird. Im Zuge der Angebotserstellung erfolgt eine technische Kalkulation des Mengenbedarfs an Ressourcen, der notwendig ist, um den Kundenwunsch zu erfüllen, und anschließend die kaufmännische Kalkulation, die letztendlich die Mengen monetär bewertet. Diese Aufteilung in technische und kaufmännische Kalkulation kann in einer Vielzahl von Unternehmen beobachtet werden, die Produkte in Form von Hardware erstellen (vgl. Souchoroukov (2004, S.

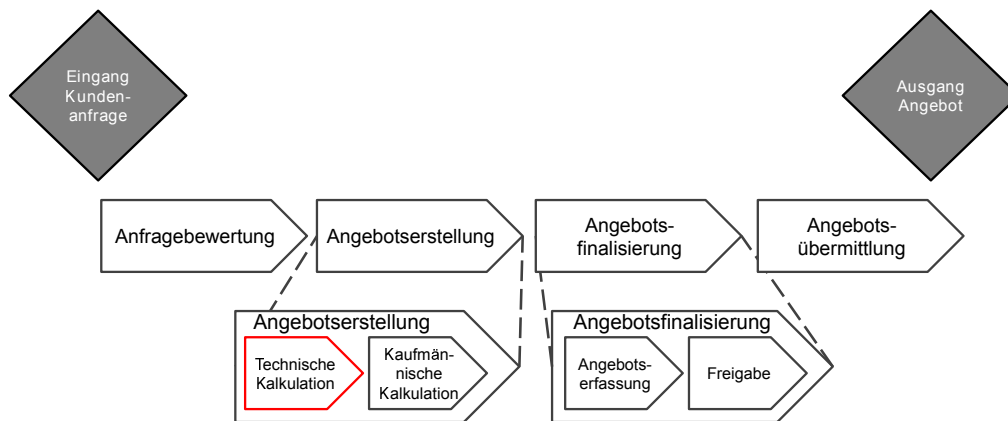


Abb. 2.11: Darstellung der Hauptprozessschritte eines generischen Angebotsprozesses (eigene Darstellung in Anlehnung an Erichsen & Riederer (2014, S. 21 f.), Schuh et al. (2008, S. 32) und Staud (2006, S. 24 ff.))

26)). Vielfach verwenden technische Kalkulatoren einen Bottom-Up Ansatz, wobei sie im Detail die Produktion betrachten sowie auslegen, und kaufmännische Kalkulatoren einen Top-Down Ansatz mit dem Fokus auf die Gesamtkosten, um verschiedene Lösungsalternativen vergleichen zu können (vgl. Souchoroukov (2004, S. 26)).). In der darauffolgenden Angebotsfinalisierung werden die Angebotswerte zentral erfasst und von der verantwortlichen Stelle im Unternehmen freigegeben, um im letzten Schritt das Angebot an den Kunden zu übermitteln.

Die Angebotslegung an sich stellt einen sehr komplexen Prozess von Entscheidungsfindungen dar, der auf gleichzeitig stattfindenden Bewertungen von abhängigen Variablen basiert. Jedes Angebot besitzt hierbei einen spezifischen Charakter mit speziellen Herausforderungen. Chua et al. (2001, S. 35) stellen in ihrem Modell den Wettbewerb, die Position des Unternehmens im Angebot, die Risikobereitschaft und die Notwendigkeit eines Auftrages als Hauptfaktoren dar. Diese werden wiederum allgemein durch unternehmensinterne Faktoren, wie beispielsweise die Auftragslage, und unternehmensexterne, wie beispielsweise die wirtschaftliche Situation, beeinflusst. Generell treten Unsicherheiten im Zuge der Angebotslegung aufgrund der begrenzten Genauigkeit in der Kalkulation und in der Unschärfe der zur Angebotslegung notwendigen Information auf. (vgl. Chua et al. (2001, S. 35 ff.))

2.4.1 Vorkalkulation im Rahmen der Kostenrechnung

Die Ermittlung der Kosten stellt einen entscheidenden Teil der Angebotslegung dar. Kostenrechnungen werden grundsätzlich freiwillig erstellt und unterliegen keiner gesamtheitlichen Regelung (vgl. Carr (1989, S. 545 f.)). Dennoch sind einige Kostenrechnungsarten etabliert (vgl. Schwaiger (2013, S. 6 ff.)). Generell können Kosten in entstandene und

entstehende Kosten unterteilt werden, die im Zuge von Vor-, Zwischen- und Nachkalkulationen ermittelt werden und einen Teil der Kostenrechnung darstellen (vgl. Steward (1995b, S. 1 f.)). Im Zuge dieser Arbeit wird auf die zukünftig entstehenden Kosten und die Vorkalkulation näher eingegangen. Diese Kosten werden durch den zukünftigen bewerteten Verzehr von Vermögen, Gütern und Diensten wiedergegeben, der zur Erstellung einer betrieblichen Leistung in einer definierten Periode dient, und werden im Zuge einer Kostenschätzung ermittelt (vgl. Zunk et al. (2013, S. 6 f.), Schwaiger (2013, S. 6 ff.) und Westkämper (2006, S. 75 ff.)). Die Vorkalkulation versucht, Kosten eines Produktes vorauszusagen, bevor dieses produziert wird (vgl. Aderoba (1997, S. 257)).

Kostenartenrechnung

Hilfreich in der Kostenschätzung für Produktionsunternehmen ist eine Unterteilung in fixe und variable Kosten nach der klassischen Kostenrechnung (vgl. Zunk et al. (2013, S. 28 f.), Ramsauer (2009, S. 43 f.), Westkämper (2006, S. 79 ff.) und Lovett (1995, S. 407)). Als fixe Kosten werden solche bezeichnet, die unabhängig von der Stückzahl und Produktionsauslastung anfallen (vgl. Schwaiger (2013, S. 62)). Vielfach hängen die fixen Kosten pro Stück von Investitionen für Produktionsequipment ab und verhalten sich umgekehrt proportional zur geplanten Stückzahl des Produktes (vgl. Ramsauer (2009, S. 43)). Fixkosten können in Kosten unterschieden werden, die sich absolut fix und sprungfix verhalten (Swoboda et al. (2004, S. 130)). Die sogenannten sprungfixen Kosten sind in einem gewissen Stückzahlbereich unabhängig von diesem, steigen jedoch bei Überschreiten einer definierten Stückzahlmenge sprunghaft an. Variable Kosten hängen hingegen direkt von der Stückzahl oder Ausbringungsmenge ab (vgl. Zunk et al. (2013, S. 29) und Schwaiger (2013, S. 62)). Sie entstehen durch die Verwendung von Produktionsfaktoren im Zuge der Leistungserstellung, beispielsweise von verwendeten Materialien, Arbeitsleistungen und verbrauchter Energie (vgl. Ramsauer (2009, S. 43)). Zusätzlich können noch Mischkosten erwähnt werden, die sowohl einen fixen als auch einen variablen Anteil besitzen, jedoch aus Gründen der Vereinfachung zu einem Kostenfaktor zusammengefasst werden.

Außerdem zeigt sich eine Unterscheidung der Kosten nach Art der Verrechnung als vorteilhaft. Diese Unterscheidung erfolgt in Einzelkosten, die direkt einer Aktivität zur Leistungserstellung zugeordnet werden können, und Gemeinkosten, bei denen eine direkte Zuordnung nicht möglich ist (vgl. Schwaiger (2013, S. 62) und Steward (1995b, S. 33)). Für die Kostenrechnung existiert in der Literatur und Praxis eine Vielzahl an Kostenverrechnungsmodellen ohne einheitlich definierten Regelwerk, jedoch mit übergreifenden Prinzipien, die in der Praxis Beachtung finden (vgl. Schwaiger (2013, S. 6 ff.) und Carr (1989, S. 545)). Als gemeinsame Basis dienen den Kostenrechnungsvarianten nach Schmalenbach (1919, S. 267 ff.) jene Kosten, die mit der Leistungserstellung einhergehen. Diese Leistungserstellung steht daher im Mittelpunkt der Betrachtung. Hierbei

wird der dafür notwendige Einsatz beziehungsweise Ge- und Verbrauch von Produktionsfaktoren monetär bewertet (vgl. Schwaiger (2013, S. 6 ff.)). Die Zuordnung der Kosten erfolgt unter anderem nach dem Verursacherprinzip (vgl. Zunk et al. (2013, S. 26) und Schwaiger (2013, S. 6 ff.)). Dem Verursacher werden die verbrauchten Repetier- und gebrauchten Potentialfaktoren, wie in Kapitel 2.3.1 definiert, zugeordnet und monetär bewertet.

Kostenstellenrechnung

Im Unternehmen kann es zielführend sein, Teilbereiche zu definieren, die für diese funktional, räumlich oder organisatorisch abgegrenzten Bereiche die Kosten erfassen (vgl. Zunk et al. (2013, S. 105)). Für diese sogenannten Kostenstellen werden die Kosten getrennt geplant und kontrolliert (vgl. Westkämper (2006, S. 87)). Im Zuge einer innerbetrieblichen Leistungsverrechnung werden alle Kosten den direkt an der Herstellung beteiligten Kostenstellen weiterverrechnet (vgl. Westkämper (2006, S. 89 f.)). Grundlegend wird dabei die Frage beantwortet, wo die Kosten anfallen (vgl. Swoboda et al. (2004, S. 18)).

Kostenträgerrechnung

Eine der Hauptaufgaben der Kostenträgerrechnung besteht in der Ermittlung der Herstell- und Selbstkosten je Stück oder Zeitraum (vgl. Thommen & Achleitner (2003, S. 448)). Bei der Angebotserstellung für ein konkretes Fabrikprojekt stehen die Kosten im Vordergrund, die diesem zugerechnet werden können. Das Projekt wird somit als Kostenträger betrachtet. Im Mittelpunkt des Interesses steht daher nicht eine gesamtbetriebliche Ermittlung der Kosten auf Unternehmensebene mit vorgegebenen regelmäßigen Perioden, sondern eine projektspezifische Kalkulation für einen einmaligen, fest definierten Zeitabschnitt in der Zukunft. Für die Kostenträger, die als Verursacher der Kosten gelten, werden hierbei die Einzelkosten ermittelt, die für das Projekt direkt anfallen werden (vgl. Zunk et al. (2013, S. 121 f.) und Westkämper (2006, S. 80 f.)). Durch die innerbetriebliche Zuschlagskalkulation werden diese Einzelkosten über einen Umlagenschlüssel mit den Gemeinkosten ergänzt.

Der mengenmäßige Ge- und Verbrauch der Produktionsfaktoren im Zuge der Leistungserstellung stellt somit die Grundlage für die Vorkalkulation dar. Genau dies steht im Mittelpunkt der Betrachtung dieser Arbeit. Für eine gesamtheitliche Kostenermittlung muss diese jedoch als dynamischer und integrativer Prozess von technischen und kaufmännischen Funktionen im Unternehmen verstanden werden (vgl. Steward (1995b, S. 1)). Grundsätzlich besteht das Risiko, Geschäftsmöglichkeiten zu verlieren, wenn Kosten unrealistisch eingeschätzt werden (vgl. Steward (1995b, S. 1)). Steward (1995b, S. 1) nennt

als Grund hierfür ein Versagen im Kostenmanagement, einen systematischen, methodischen Kostenermittlungsprozess einzuführen, der auf kontinuierlich erhobenen Daten im Zuge der vergangenheitsbezogenen Kostenrechnung beruht.

Einen Überblick über Kostenunterscheidungsmöglichkeiten gibt abschließend Abbildung 2.12 wieder.

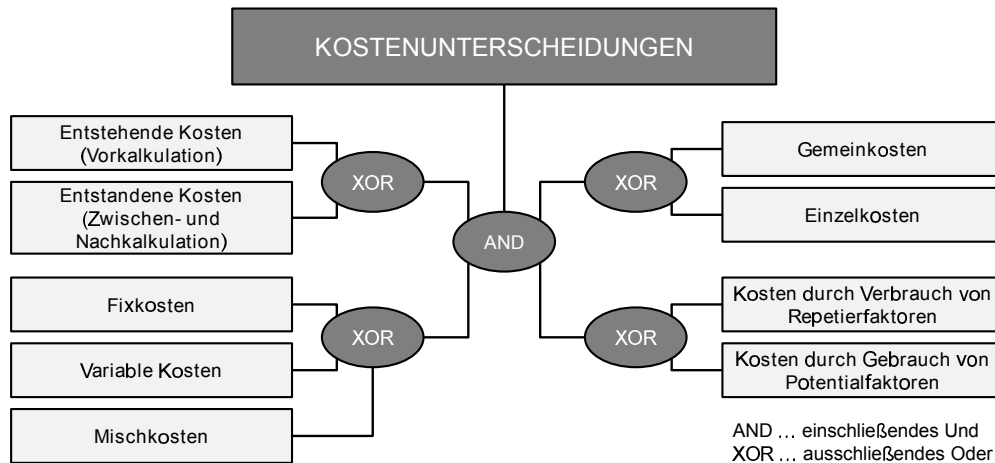


Abb. 2.12: Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Möglichkeiten zu Kostenunterscheidungen

2.4.2 Methoden der Vorkalkulation

Es bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Bestimmung der Kosten im Zuge der Vorkalkulation und ebenso wurden viele Möglichkeiten zur Gliederung dieser Methoden gefunden. In diesem Kapitel soll ein grober Überblick gegeben werden, welche Möglichkeiten generell bestehen, Vorkalkulationen durchzuführen. An dieser Stelle sei auf die weiterführende Literatur verwiesen, die sich ausführlich mit diesem Thema auseinandersetzt, jedoch ihre Einteilung nicht einheitlich vornimmt, beziehungsweise nur Teile der Methoden betrachtet (vgl. Chou (2011), Rimpau (2010), Niazi et al. (2006) und Souchoroukov (2004)).

Carr (1989) erkannte übergreifende Prinzipien zur Vorkalkulation, die sich in den modernen Methoden widerspiegeln. Eine Vorkalkulation zeigt dabei ein Abbild der zukünftigen Wirklichkeit, das entweder auf vergangener Arbeit, detaillierten Analysen oder auf Expertenschätzungen beruht. Trotz Datenaufbereitungen und Methodenentwicklungen liegt die Vorkalkulation immer in der Verantwortung des Experten. Je Anwendung muss entschieden werden, welcher Detaillierungslevel verwendet werden muss, um Entscheidungen vorzubereiten. Nachdem für Kalkulationen Zeit benötigt wird, ist folglich abzuwägen, welcher Unsicherheitsgrad in der Planung akzeptabel ist. Der Kalkulator muss berücksichtigen, welchen Einfluss der Detaillierungsgrad auf die Exaktheit des Ergebnisses besitzt. Im Zuge der Kalkulation ist eine Dokumentation über die Inhalte und zugrundeliegenden

Entscheidungen unerlässlich, die eine Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses ermöglicht. Gerade bei mehreren Kalkulationsschleifen mit Änderungen im Projekt ist eine entsprechende Dokumentation für spätere Anwendungen von entscheidender Bedeutung. Zusätzlich ist die Unterscheidung in fixe und variable sowie in Gemein- und Einzelkosten ein Prinzip der Vorkalkulation. Abschließend muss den beteiligten Personen jedoch bewusst sein, dass eine Vorkalkulation von der Natur der Sache her unsicher ist, jedoch die Unsicherheit mit geeigneten Strategien kontrolliert werden kann. Der schlimmste Fall in einer Vorkalkulation besteht jedoch darin, nicht über Unsicherheiten und über die Wahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlers Bescheid zu wissen. (vgl. Carr (1989))

Um eine Gliederung der Methoden vorzunehmen, werden qualitative und quantitative Kalkulationsmethoden unterschieden. Während qualitative Methoden auf historische Daten und Expertenwissen aufbauen, um subjektiv aufgrund von Analogien und Intuitionen Kosten zu ermitteln, werden für den quantitativen Ansatz nicht nur diese Daten und dieses Fachwissen verwendet, sondern auch detaillierte Analysen bezüglich der Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen im konkreten Projekt (vgl. Chou (2011, S. 707) und Niazi et al. (2006, S. 563 f.)). Bei den quantitativen Methoden sind in den letzten Jahren entscheidende Ergänzungen getroffen worden. Während ältere Zusammenfassungen verschiedene Methoden betrachten, die alle eine deterministische Basis besitzen (vgl. Niazi et al. (2006), Souchoroukov (2004) und Duverlie & Castelain (1999)), zeigen jüngere Betrachtungen das Potential von stochastischen Methoden (vgl. Chou (2011) und Rimpau (2010)).

Deterministische Ansätze finden weit verbreitet Anwendung, wenn Informationen für die Kalkulation in einer entsprechenden Genauigkeit vorhanden sind. In diesen Ansätzen werden für die Teilsysteme der Produktion Einzelwerte ermittelt und dann zu einem Gesamtwert aggregiert. Jedoch tritt hierbei oft der Fall auf, dass die Informationen nicht in der Genauigkeit vorhanden sind, um eine Vorkalkulation mit Einzelwerten berechnen zu können. Aufgrund von Unsicherheiten in den Informationen genügt ein deterministischer Ansatz nicht mehr, um das potentielle Risiko abzubilden.

Stochastische Ansätze bieten hierfür eine Möglichkeit, mit der Unsicherheit umzugehen, diese zu quantifizieren und somit in der Vorkalkulation zu berücksichtigen. Gerade für eine frühe Phase der Vorkalkulation mit wenig detaillierten Informationen bieten diese Ansätze Potential, entsprechende Ergebnisse und nutzbare Informationen zu liefern. Neben den stochastischen Ansätzen der quantitativen Methoden bieten auch die qualitativen Methoden Möglichkeiten, mit wenig spezifizierten Produkt- und Produktionsinformationen zu arbeiten. (vgl. Chou (2011, S. 706 f.))

Generell bieten die unterschiedlichen Methoden Vorteile bei spezifischen Kontexten, die im jeweiligen Anwendungsfall getrennt analysiert werden sollen. Oftmals bietet gerade eine Kombination von verschiedenen Methoden das bestmögliche Ergebnis in der Anwendung. (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 895))

In Abbildung 2.13 werden die grundlegenden Einteilungen der Kostenkalkulationsmethoden und nachfolgend die in der Literatur als wichtig definierten Methoden überblicksmäßig dargestellt. In Tabelle 2.1 werden die vorgestellten Methoden den definierten Gliederungen zugeordnet. Aufgrund von Mischformen, Kombinationen und unterschiedlichen Ausprägungen der einzelnen Methoden ist eine eindeutige Zuordnung nicht immer gegeben.

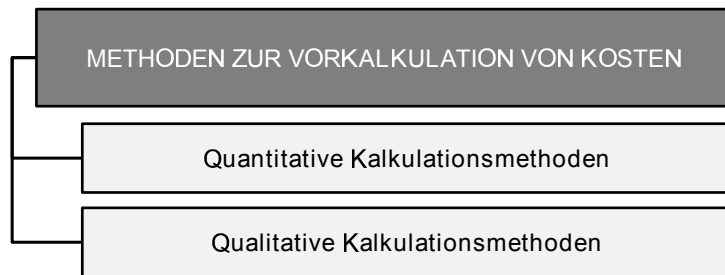


Abb. 2.13: Einteilung der Methoden zur Vorkalkulation von Kosten (eigene Darstellung in Anlehnung an Chou (2011, S. 706 f.) und Niazi et al. (2006, S. 564))

Expertenschätzung und -system

Basierend auf vergangenen Erfahrungen schätzen Experten und Know-how-Träger die Kosten zukünftiger Produkte, weshalb diese Methode den qualitativen Vorkalkulationsmethoden zugeteilt wird. Die Erfahrungen stützen sich auf ähnliche Produkte oder ähnliche Problemstellungen, denen der Experte in seiner Vergangenheit schon begegnet ist. Diese Methode zeigt eine starke Abhängigkeit von der Bekanntheit des Problemgebiets der beteiligten Kalkulatoren. Die hohe Subjektivität dieses Ansatzes wird durch das Fehlen einer durchgängigen Methode verstärkt. Im Zuge der Kalkulation müssen für neue Produkte intuitiv Annahmen und Schätzungen getroffen werden, die schwierig systematisch als Regeln abgebildet werden können. (vgl. Souchoroukov (2004, S. 50))

Einen pragmatischen Ansatz zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bietet dabei ein Fixieren von Prämissen durch Experten- und Management-Urteile (vgl. Zhang et al. (2011, S. 598 f.)). Dies ist insbesondere bei den Unsicherheiten in Bezug auf die Produktinformationen anwendbar, die vom Kunden nicht in ausreichender Form zur Verfügung gestellt wurden. Vielfach werden in Unternehmen Sicherheitsaufschläge vorgenommen, da die Ergebnisse mit Einzelwerten keine Unsicherheitsbeschreibungen zulassen. Zwar schränken gewisse Prämissen den Lösungsraum generell ein, jedoch ergibt die Planungstätigkeit vielfach verschiedene Möglichkeiten der Umsetzung, die einen unsicheren Output der Schätzung verursachen.

Ist es möglich, die vergangenen Erfahrungen in einer Datenbank als Wissen zugänglich zu machen, sprechen Niazi et al. (2006, S. 567) von einem Expertensystem. Basierend

Kalkulationsmethode	Gliederung	Zusatzinformation
Expertenschätzung	qualitativ	Expertenwissen als Basis der Kalkulation, intuitiv;
Expertensystem	qualitativ	Systematisierung vom Expertenwissen als Basis der Kalkulation, intuitiv, analogiebasierend;
Analogiebasierende Kostenkalkulation	qualitativ	Ermittlung von Ähnlichkeiten, analogiebasierend, intuitiv;
Parametrische Kostenkalkulation	quantitativ	Ermittlung von wichtigen Parametern als Kostentreiber, deterministisch
Detaillkostenkalkulation	quantitativ	Ermittlung von Detailkosten, deterministisch
Stochastische Kostenkalkulation	quantitativ und qualitativ	Quantifizierung von Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeiten, stochastisch
Kostenkalkulation auf Basis von Fuzzylogik	qualitativ	Beschreibung von Unschärfen, intuitiv, analogiebasierend
Kostenkalkulation auf Basis von künstlicher Intelligenz	qualitativ	künstliche Wissensabbildung auf Basis historischer Daten, analogiebasierend
Kostenkalkulation auf Basis von Regressionsanalysen	qualitativ	Abbildung der mathematischen Zusammenhänge auf Basis historischer Daten, analogiebasierend
Kostenkalkulation auf Basis von PERT/Cost	quantitativ und qualitativ	Abbildung eines Netzwerks kritischer Kostenpfade mit möglichen Bereichen für Kosten, stochastisch
Kostenkalkulation auf Basis von Bayesischen Netzen	quantitativ und qualitativ	Netz aus kausalen Beziehungen mit deren Wahrscheinlichkeit, stochastisch

Tab. 2.1: Übersicht über Methoden zur Vorkalkulation von Kosten (vgl. Chou (2011, S. 706 f.) und Niazi et al. (2006, S. 564))

auf dem vergangenen, abgespeicherten Wissen werden neue Kalkulationen gelegt, indem die alten Daten verwendet und an die neuen Projektanforderungen angepasst werden. Dadurch wird der Vorteil geschaffen, die Daten strukturiert, schnell zugänglich, vergleichbar und standardisiert zur Verfügung zu haben. Es wird auch versucht, von einer intuitiven Expertenschätzung auf ein analogiebasiertes System überzuleiten, ohne auf die Zusammenhänge der Kosten im Detail einzugehen. (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567))

Generell muss bei dieser Methode beachtet werden, dass die Expertenschätzung in einem unstrukturierten Rahmen abläuft, der wenig Nachvollziehbarkeit im Hinblick darauf bietet, wie Entscheidungen im Rahmen des Planungsprozesses getroffen werden. Aufgrund des starken Einflusses des Einzelnen treten Unsicherheiten in den Kosten auf, die jedoch undokumentiert bleiben. Bei komplexen Produkten und Kostenverhalten stößt diese Methode sehr schnell an ihre Grenzen.

Analogiebasierende Kostenkalkulation

Analogiebasierende Methoden versuchen, aufgrund der Ähnlichkeiten von Produkten oder Projekten anhand von Analogien auf die Kosten zu schließen (vgl. Souchoroukov (2004, S. 55 f.)). Hierbei steht ein Vergleich des zu planenden Objekts mit vergangenen Daten im Vordergrund, die dann bezüglich ihrer Ähnlichkeit beurteilt werden (vgl. Souchoroukov (2004, S. 55 f.)). Nachdem dieser Ansatz auf vergangenen Daten und Expertenwissen aufbaut, wird auch dieser den qualitativen Methoden zugeordnet.

Der Ansatz von Case-Based Reasoning (CBR) als weitverbreitete analogiebasierende Methode stellt eine systematische Ablage von vergangenen Kostenkalkulationen in den Mittelpunkt (vgl. Souchoroukov (2004, S. 56)). Ausgehend von diesen werden für neue Projekte die Ähnlichkeiten überprüft und den neuen Gegebenheiten angepasst (Niazi et al. (2006, S. 564)). Hierfür werden folgende Schritte durchlaufen: Erkennung eines Problems, Wiedererkennung einer ähnlichen Erfahrung und deren Lösungsweg, Auswahl und Adaption des ausgewählten Problems (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 897)). Die Methode findet vielfältige Anwendung in verschiedenen Fachgebieten und Industrien, wie Customer-Relationship-Management, Benchmarking, Kostenkalkulation im Bereich der Produktion, des Bau- und Gesundheitswesens und anderer Branchen, wobei Vorteile in Bezug auf den Zeitbedarf bei der Anwendung, bei dem Umgang mit unsicheren Daten und auch bei der Ergebnisqualität festgestellt werden (vgl. Chou (2009, S. 2948 ff.)). Im Vordergrund dieser Anwendung stehen die Analogien zwischen zukünftigen Projekten und vergangenen Daten. Gerade zur Quantifizierung der Analogien werden Bestrebungen durchgeführt, diese von einem intuitiven Ansatz der Expertenschätzung auf ein regelbasiertes System überzuführen, wobei dies nicht für jeden Fall möglich ist (vgl. Chou (2009, S. 2951 ff.), Chua et al. (2001, S. 37 ff.) und Duverlie & Castelain (1999, S. 897)). Mit einem kontinuierlichen Wachsen der Anzahl verschiedenartiger Projekte in

der Datenbank steigt auch das Potential dieser Methode (vgl. Chou (2009, S. 2948)). Die systematische Wiederverwendung vergangener Projekte kann als Erweiterung des Gedächtnisses des Menschen interpretiert werden (Chou et al. (2009, S. 2948)). Neben der Analogiemessung besteht dabei eine weitere Herausforderung in der Anpassung der gefundenen Fälle der Vergangenheit an die neuen Gegebenheiten (vgl. Chua et al. (2001)).

Diese Methode zeigt wieder ihr Potential in frühen Planungsphasen bei Projekten mit nichtlinearen Abhängigkeiten der Kosten, wobei das Ergebnis stark von den Daten, die zur Verfügung stehen, und von der Quantifizierung der Analogien abhängig ist (vgl. Chou (2009, S. 2950)). Bei der Einführung dieses Systems können Schwierigkeiten auftreten, da vergangene Daten für das System nicht aufbereitet sind, Anwender aber eine umfangreiche Datenbasis benötigen, um Kalkulationen durchführen zu können (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 900)). Wenn die Daten jedoch aufgrund von Vorarbeiten vorhanden sind, können Ergebnisse erzielt werden, ohne jedes Detail präzise betrachten zu müssen (vgl. Chou et al. (2009, S. 2948)). Sowohl eine quantitative als auch qualitative Datenverwendung ist möglich (vgl. Chou et al. (2009, S. 2948)). Eine Besonderheit stellen die Quantifizierungen der Analogien und deren Nachvollziehbarkeit dar. Außerdem bietet diese Methode Vorteile bei der Nachvollziehbarkeit der getroffenen Änderungen und der Grundelemente des Ergebnisses. (vgl. Souchoroukov (2004, S. 56))

Parametrische Kostenkalkulation

Bei der parametrischen Kostenkalkulation, für die vielfach auch der Ausdruck Cost Estimating Relationship (CER) verwendet wird, werden Abhängigkeiten mathematisch formuliert, um Kosten zu ermitteln (vgl. Souchoroukov (2004, S. 53)). Kosten werden dabei als Funktion von ausgewählten physischen oder leistungsbezogenen Parametern abgebildet, wobei vielfach für diese Parameter der Ausdruck Kostentreiber verwendet wird (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567)). Eine fundierte Analyse von Kostenzusammenhängen ist ein Kennzeichen von quantitativen Vorkalkulationsmethoden, denen der hier beschriebene Ansatz zugeordnet wird. Im Mittelpunkt der Anwendung steht zum einen die Identifikation von Kostenabhängigkeiten und zum anderen die Formulierung der Zusammenhänge. Farineau et al. (2001, S. 81) beschreiben drei Möglichkeiten dafür. Im ersten Fall werden die signifikantesten technischen Parameter analysiert und für diese die Kosten im Verhältnis zur verbrauchten Menge in Beziehung gestellt. Die zweite Möglichkeit besteht in der Anwendung von statistischen Methoden, um auf Basis vergangener Produktionsdaten sowohl die Kostentreiber herauszufinden, als auch die Zusammenhänge zu kalibrieren. Drittens können Abhängigkeiten von Kostentriibern in mathematischen Formeln abgebildet werden, wobei hierfür für jeden Anwendungsfall diese Abhängigkeiten beispielsweise mit statistischen Methoden analysiert werden.

Auch die Methode der parametrischen Kostenkalkulation findet ihre Anwendung in vielen

verschiedenen Bereichen, wie beispielsweise der chemischen Industrie, Flugzeugindustrie und Softwareentwicklung (vgl. Hamaker (1995, S. 233)). Während Vorteile in der einfachen, kostengünstigen und schnellen Anwendung gesehen werden, treten Herausforderungen im Zuge dieser Anwendung auf, wenn nicht alle Informationen vorhanden sind, um das parametrische Modell komplett zu füllen (vgl. Farineau et al. (2001, S. 81)). In diesem Fall muss der Anwender Annahmen für die fehlenden Parameter treffen, um ein Ergebnis aus den formulierten Zusammenhängen zu erhalten (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 896)). Aus dem Ergebnis ist jedoch nicht ersichtlich, ob dieses auf Annahmen und Unsicherheiten basiert. Zusätzlich besitzt diese Kostenkalkulationsmethode eine begrenzte Beeinflussbarkeit der Abhängigkeiten und Nachvollziehbarkeit der ermittelten Werte, da die Abhängigkeiten in den mathematischen Formeln fixiert sind. Eine Fehlererkennung ist aufgrund dieses Black-Box-Verhaltens nur schwierig möglich (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 897)). Für eine Überarbeitung der Beziehungen aufgrund neuartiger, atypischer Produkte muss das Modell neu kalibriert werden, wobei hierfür die historischen Daten fehlen (Farineau et al. (2001, S. 81)).

Detailkostenkalkulation

Die Detailkostenkalkulation oder auch analytische Kostenkalkulation benötigt ein Zerlegen des zu planenden Projekts in elementare Einheiten, Prozesse und Aktivitäten, welche Produktionsfaktoren ge- und verbrauchen. Die Kosten für den Ge- und Verbrauch der Produktionsfaktoren werden über alle Einzelergebnisse und mittels einer entsprechenden Zuschlagskalkulation für das Gesamtprojekt aggregiert, weshalb man von einer quantitativen Methode spricht. Der Prozess zur Kostenkalkulation ist eine Kombination von parallelen und seriellen Schritten, die unterschiedliche Abhängigkeiten voneinander besitzen und schlussendlich ein kumuliertes Gesamtergebnis liefern (vgl. Steward (1995a, S. 193)). Ziel ist hierbei eine äußerst präzise und nachvollziehbare Kostenermittlung (vgl. Farineau et al. (2001, S. 80)). Anhand der Anforderungen im Projekt werden die notwendigen Produktionsprozesse geplant und die erforderlichen Ressourcen zugeteilt. Bei der Planung steht die notwendige Fertigungszeit im Verhältnis zur Taktzeit im Vordergrund, um den mengenmäßigen Einsatz an Ressourcen abzuleiten. Werden Produktdetails auf spezifische Produktmerkmale hinsichtlich der Konstruktion oder der Produktionsprozesse heruntergebrochen und die Kosten dieser Merkmale betrachtet, spricht man von der merkmalsbasierten Kostenkalkulation als Teilgebiet der Detailkostenkalkulation (vgl. Niazi et al. (2006, S. 568) und Souchoroukov (2004, S. 55)).

Die Kostenrechnung kann ebenfalls auf der Basis der Aktivitäten im Zuge des Produktionsprozesses aufgebaut werden, indem der Ressourcenver- und -gebrauch je Produktionsprozess in den Mittelpunkt gestellt wird (vgl. Niazi et al. (2006, S. 569), Shuford (1995, S. 50)). Die Kosten bestehen somit aus den Kosten der einzelnen Aktivitäten, die für die

Produktion notwendig sind (vgl. Aderoba (1997, S. 258)). Dieser Ansatz wird als aktivitätsbezogene Kostenkalkulation bezeichnet und bietet vor allem Vorteile hinsichtlich der Aufteilung der Gemeinkosten bei Produktionen kleiner Produktionslose und verschiedenartiger Produkte (vgl. Shuford (1995, S. 51)).

Mit dieser Methode werden die Kosten in einem sehr hohen Detaillierungsgrad ermittelt. Anschließend können sie zu verschiedenen Detailergebnissen aggregiert und dann analysiert werden, wodurch ihre Nachvollziehbarkeit gegeben ist. Aufgrund der Detailplanung können von Experten auch Produkte geplant werden, die neuartigen Charakter besitzen und von vergangenen Produktionen abweichen. Eine Datenbasis vergangener Projekte ist nicht notwendig, wobei die Methode von Experten abhängig ist, die im Detail die Produktion planen (vgl. Niazi et al. (2006, S. 568 f.)). Dabei müssen die Experten auf verschiedene Planungsmethoden zurückgreifen, um die Basis der Kosten ermitteln zu können. Jedoch besteht die Notwendigkeit, detaillierte Informationen über das Produkt und die Produktionsbedingungen zu erhalten, um eine Detailkalkulation durchführen zu können (vgl. Farineau et al. (2001, S. 80)). Beim Fehlen dieser Informationen müssen von den Experten Annahmen getroffen werden, um die Planung durchführen zu können. Die Unsicherheiten bezüglich der Informationen und auch der Planungen bleiben dabei undokumentiert. Zusätzlich nimmt diese Methode viel Zeit der Planer dafür in Anspruch, Ergebnisse zu liefern und Abhängigkeiten unterschiedlicher Bereiche zu diskutieren, um ein Gesamtoptimum zu erreichen (vgl. Farineau et al. (2001, S. 80)). Die Möglichkeiten zur Planung von verschiedenen Realisierungsalternativen ist dadurch begrenzt. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge, die in keinem Modell abgebildet sind, sondern im Zuge des Planungsprozesses in der Kooperation verschiedener Experten gelöst werden, sind die Kostenauswirkungen bei Änderungen nur sehr schwierig vorauszusagen.

Stochastische Kostenkalkulation

Gerade Unsicherheiten im Zuge der Kostenkalkulation werden durch deterministische Ansätze mit Einzelwerten nur ungenügend berücksichtigt. Um Unsicherheiten bewusst mitzubetrachten, bieten stochastische Ansätze eine Möglichkeit, einen Bereich zu definieren, in dem sich das mögliche Ergebnis befindet (vgl. Elkjaer (2000, S. 139)). Die Monte-Carlo-Simulation als Synonym für stochastische Simulation bietet eine einfache Möglichkeit, dies in der Praxis umzusetzen und dadurch einen entscheidenden Einfluss auf Teilkosten und somit auch auf die Gesamtkosten zu nehmen (vgl. Elkjaer (2000, S. 139 f.)). Erst eine Berücksichtigung der Unsicherheiten in der Kalkulation bietet das Potential, das Risiko der Kosten quantifiziert abzubilden. Anhand der beschriebenen Bereiche können zusätzliche Informationen über Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit abgebildet werden, die über Iterationen im Zuge der Simulation realisiert werden (vgl. Chou (2011, S. 707)).

Stochastische Ansätze bieten die Möglichkeit, Unsicherheiten zu quantifizieren und mit verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen die möglichen Ergebnisbereiche zu modellieren. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Analyse der Abhängigkeiten unsicherer Parameter voneinander dar, die im Zuge einer Aggregation berücksichtigt werden müssen (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 2)). Diese Abhängigkeiten können zum einen auf Basis von historischen Daten analysiert und zum anderen durch Experten geschätzt werden (vgl. Touran (1993, S. 64)). Zusätzlich werden für die Quantifizierung der Unsicherheiten Informationen über den Bereich und die Art der Verteilung benötigt, die ebenfalls auf Expertenschätzungen oder historischen Daten beruhen (vgl. van Drop & Kotz (2002)). Während mit stochastischen Kalkulationsmethoden Unsicherheiten berücksichtigt werden können, werden außerdem Informationen benötigt, die im Zuge der Kostenkalkulation einen Zusatzaufwand darstellen. Diese Methode findet beispielsweise Anwendung in der Finanzwirtschaft, dem Projektmanagement, dem Bauwesen, der Flugzeugindustrie, dem Risikomanagement und den Prognosen bezüglich der Nachfrage am Markt (vgl. Deutsch (2008), Touran & Wiser (1992) Yang (2011), Gudmundsson (2014), Gleißner (2004) und Zhang et al. (2011)).

Generell besteht die Möglichkeit, stochastische Ansätze sowohl bei qualitativen Methoden, wie beispielsweise bei Expertenschätzungen, als auch quantitativen, wie beispielsweise bei Detailkostenkalkulationen, als Ergänzung einzusetzen. In solchen Fällen wird die Kalkulation von einem deterministischen Ansatz in einen stochastischen übergeleitet.

Ausgewählte Detailmethoden

Von der Vielfalt an möglichen Methoden der Vorkalkulation und deren Kombinationen finden noch einige spezielle Beachtung in der Literatur. Ein Ansatz mit Fuzzylogik bietet besonderes Potential zur Berücksichtigung von Unsicherheiten, indem unscharfe Mengen grundlegend definiert und sprachliche Begriffe und Zusammenhänge formalisiert werden (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567)). Durch die Fuzzylogik können Zustände nicht nur binär angenommen werden, sondern auch Zwischenwerte und dadurch Unschärfe der Informationen berücksichtigt werden (vgl. Brieke (2009, S. 32)). In Wirtschaftlichkeitsbewertungen bietet diese Methode vor allem Vorteile, wenn Unsicherheiten auftreten, diese jedoch nicht quantifiziert werden können (vgl. Brieke (2009, S. 33)). Nachdem die Fuzzylogik auf dem Expertenwissen bezüglich der unscharfen Mengen aufbaut, wird diese den qualitativen Methoden zugeordnet. Ein komplexes Modell nach der Fuzzylogik aufzubauen, bedeutet jedoch einen langwierigen Aufwand (vgl. Brieke (2009, S. 34) und Niazi et al. (2006, S. 567)). Zusätzlich beinhaltet dieses Modell Schwächen in der intuitiven Nachvollziehbarkeit (vgl. Brieke (2009, S. 34)). Es existieren auch Versuche, die Fuzzylogik mit der stochastischen Kostenkalkulation zu kombinieren, um die Vorteile beider Methoden auszuschöpfen (vgl. Zhang et al. (2011)).

Bei komplexen Aufgaben bieten künstliche neuronale Netze (KNN) als Teil der Ansätze der künstlichen Intelligenz eine Alternative, um aufwändige Simulationen zu ersetzen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 127)). Neuronale Netze bilden die Arbeitsweise des menschlichen Gehirns künstlich ab. Entscheidungen können dabei, wie bei einem menschlichen Anwender, auf Basis von abgebildetem Wissen ohne perfekte Datenbasis getroffen werden (vgl. Johannes (1995, S. 633 f.)). Dadurch können auch Fragen, die im Zuge des künstlichen Wissenbildens noch nicht behandelt wurden, beantwortet werden (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567)). Neuronale Netze bieten somit Möglichkeiten, sowohl mit Unsicherheiten als auch mit Nichtlinearitäten umzugehen (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567)). Gerade bei neuronalen Netzen treten die Nachteile eines Black-Box-Verhaltens und einer Abhängigkeit von historischen Daten auf (vgl. Chua et al. (2001, S. 35)). Ein neuronales Netz lernt von den Fällen, die bei der Erstellung zur Verfügung stehen, und bildet diese in Form von Zusammenhängen ab, auf die jedoch nicht zugegriffen werden kann (vgl. Chua et al. (2001, S. 35)). Da bei neuronalen Netzen die Produktionskosten nicht im Detail betrachtet werden, sondern Zusammenhänge auf Basis von historischen Daten abgebildet werden, zählen diese zu den qualitativen Methoden.

Regressionsanalysen auf Basis von historischen Daten tragen ebenfalls dazu bei, Vorkalkulationen durchführen zu können und werden zu den qualitativen Methoden gezählt. Anhand der Analyse von historischen Daten werden lineare Abhängigkeiten von kostenverursachenden Parametern anhand der Regressionsanalyse ermittelt und in einem mathematischen Modell abgebildet (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 4 und 77) und Niazi et al. (2006, S. 567)). Neue Parameter werden dann als Input in dieses Modell eingebracht, wodurch die Kosten des neuen Projektes auf Basis von Ähnlichkeiten ermittelt werden (vgl. Niazi et al. (2006, S. 567)). Nachteilig verhält sich wieder die Abhängigkeit von vergangenen Fällen, die allein das mathematische Modell beeinflussen. Für atypische neuartige Projekte ist diese Methode nicht anwendbar.

Bei der Methode Program Evaluation and Review Technique (PERT), die ihren Ursprung in Arbeiten des US-Militärs hat, steht die Zeitdauer eines Projektes im Fokus der Betrachtung. Basierend auf ein Netzwerk kritischer Pfade (Critical Path Methode oder kurz CPM) werden die Zeitabschnitte nicht nur mit exakten Werten, sondern auch mit möglichen Bereichen definiert. Dafür werden die Minimum-, Maximumdauer sowie die wahrscheinlichste Dauer angegeben. Die Gesamtdauer wird unter Zuhilfenahme einer Betaverteilung zur Bewertung der unsicheren Bereiche ermittelt. In Analogie zur Zeitdauerermittlung existiert auch die Kostenermittlung mit der Abkürzung PERT/COST, die einen Kostenpfad durch das Netzwerk abbildet. Obwohl mit dieser Methode Unsicherheiten berücksichtigt werden können, besitzt sie Nachteile. Grundsätzlich wird der kritische, längste Pfad ermittelt, der im Netzwerk möglich ist. Jedoch besitzen in Realität Projekte mehrere Pfade in der Nähe des kritischen Pfades, die bei einer höheren Variabilität der Werte schnell zum kritischen werden können. Ein Gesamtüberblick über die möglichen Kosten ist somit nicht gegeben. (vgl. Riley (1995, S. 282))

In den derzeitigen Modellen von PERT bleiben mögliche Abhängigkeiten der Kostenfaktoren zueinander unberücksichtigt (vgl. Wang & Demesetz (2000, S. 458)). Zusätzlich sind Modelle dieser Methode nicht fähig zu lernen und sich anzupassen (vgl. Cho (2006, S. 553)). Für die Erstellung eines Netzwerkes der kritischen Kostenpfade können sowohl Experteneinschätzungen, historische Daten als auch Detailkostenbetrachtungen herangezogen werden, weshalb keine eindeutige Zuordnung zu qualitativen oder quantitativen Kalkulationsmethoden möglich ist.

Im Gegensatz zu traditionellen Verfahren der Statistik steht die Bayessche Statistik. Hier wird keine Konstanz der Verteilungsparameter vorausgesetzt, sondern eine zeit- und zustandsabhängige Modellierung von Verteilungsparametern beziehungsweise Risiken vorgenommen (vgl. Gleißner (2014, S. 69)). Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die Risiken beschreiben, werden somit als Zufallsvariablen aufgefasst (vgl. Gleißner (2014, S. 69)). Zudem können in der Bayesschen Statistik sowohl subjektive Einschätzungen als auch objektive, gemessene Daten gleichzeitig berücksichtigt werden (vgl. Gleißner (2014, S. 69)). Eine Grundvoraussetzung zur Verwendung des Bayesschen Ansatzes ist daher die spezifische Kenntnis über die Verteilungsparameter an sich (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 455 ff.)).

Ein Bayessches Netz wird mit einem Graphen beschrieben, der aus Knoten und Pfeilen besteht (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 4 f.)). Die Knoten repräsentieren die stochastischen Parameter und die Pfeile die kausalen Beziehungen zwischen den Parametern. Dadurch können Abhängigkeiten beispielsweise in einem Projekt modelliert werden (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 4 f.)). Neben den Anwendungen im Risiko- und Projektmanagement finden sich Beispiele aus der Praxis unter anderem im Bereich von Softwarekostenkalkulationen (vgl. Chulani et al. (1999)). Eine Grundvoraussetzung zur Anwendung ist jedoch das Wissen über die Abhängigkeiten im Netz (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 456)). Gerade bei der anfänglichen Unkenntnis der Beziehungen gestaltet sich die Verwendung von Bayesschen Netzen als nicht vorteilhaft. Die Zuordnung zu den qualitativen oder quantitativen Kalkulationsmethoden ist folglich von der Basis der Netzmodellierung abhängig.

2.4.3 Schnittstellen der Angebotslegung mit der frühen Fabrikplanung

Eine Angebotslegung inklusive Vorkalkulation der Kosten für Produktionen stellt eine große Herausforderung dar, der üblicherweise mittels Teamarbeit mehrerer Experten begegnet wird (vgl. Lovett (1995, S. 408)). Bei der frühen Planung der Fabrik bestehen für jeden Bereich Besonderheiten, die durch Know-how der Experten und vergleichbare Daten aus der Vergangenheit oder von Benchmark-Produkten unterstützt werden (vgl. Lovett (1995, S. 408)). Jedem Experten steht eine Vielzahl an Quellen zur Verfügung,

die für seinen Bereich Unterstützung bieten (vgl. Lovett (1995, S. 408)). Gerade bei herausfordernden Produkten mit komplexen Produktionsanforderungen rücken die Experten in der Planung in den Mittelpunkt, um die notwendige Zeitschiene und Effizienz in der Planungsphase einhalten zu können.

Generell werden die Experten mit zwei Hauptproblemen konfrontiert: Dem hohen Level an Unsicherheit und Risiko in der Kalkulation und dem Fehlen von exakten historischen Daten der Kosten vergangener Projekte (vgl. Johannes (1995, S. 633)). Auch in jüngerer Literatur wird weiterhin auf die Schwierigkeit hingewiesen, sowohl verwendbare historische Daten für eine Vorkalkulation zu erhalten als auch mit Unsicherheiten in der Planung umgehen zu müssen (vgl. Bracht et al. (2011), Rimpau (2010), Wiendahl et al. (2009), Chou (2009), Westkämper (2006), Niazi et al. (2006) und Souchoroukov (2004)). Mit umfangreichen Datenbanken im Rahmen der Digitalen Fabrik stehen Software-Werkzeuge zur Verfügung, um strukturiert Daten von Kalkulationen und Planungen zu sammeln und sie in weiterer Folge als Basis für spätere Kalkulationen zu verwenden.

Allgemeine Anforderungen der frühen Fabrikplanung an die Vorkalkulationsmethoden

Gerade im Zuge einer frühen Phase der Fabrikplanung können laufend Änderungen der Produktinformationen Änderungen der Kalkulation auslösen. Es liegt in der Natur von Projekten, dass im Zuge von Iterationen Verbesserungen durchgeführt oder Fehler ausgebessert werden (vgl. Johannes (1995, S. 633)). Dies betrifft alle verschiedenen Projektphasen und kann Auswirkungen auf nachfolgende Phasen haben. Veränderungen in der Konstruktion haben somit in vielen Fällen Auswirkungen auf den Preis. Für spätere Betrachtungen ist es deshalb unerlässlich, dass nachvollziehbar ist, auf welcher Basis die Kosten im Detail kalkuliert wurden (Shuford (1995, S. 75)). Gerade für spätere Anwendungen als historische Daten ist die Nachvollziehbarkeit der Auslöser und Zusammenhänge der Kosten unersetzbar. Jedoch bezieht sich die Nachvollziehbarkeit der Kosten nicht nur auf die Gesamtkosten, sondern auch auf Detailkosten und Kostenarten. Aus diesem Grund ist eine Kalkulation auf Basis der grundlegenden Dimensionierungsgrößen der Fabrikplanung sowie der Digitalen Fabrik, des Personals, der Betriebsmittel und der Flächen, mit einer Unterscheidung in fixe, variable, Einzel- und Gemeinkosten unerlässlich.

Neben den erwähnten Anforderungen, die sich hauptsächlich auf eine zukünftige Datenbasis historischer Kalkulationen beziehen, ergeben sich im Zuge der Fabrikplanung auch Anforderungen hinsichtlich der Unsicherheiten. Nachdem Unsicherheiten einen systemimmanenten Charakter von Planungen darstellen, ist es notwendig, diese auch quantifizieren zu können. Nachdem jede Detailplanung von speziellen Unsicherheiten betroffen ist, besteht die Notwendigkeit, diese einzelnen Risiken auf der Ebene der Detailplanung

zu quantifizieren und dann zu einem Gesamtwert zu aggregieren. Jedoch ist bei der Auswahl der Quantifizierungsebene die Effizienz in der Anwendung ebenso zu beachten. Ein Kompromiss zwischen notwendiger Detaillierung und Zeitbedarf in der Anwendung muss bei der Umsetzung gefunden werden. Durch eine Quantifizierung wird eine Vergleichbarkeit der Risiken verschiedener Projekte, verschiedener Planungsalternativen und eine Aussagekraft hinsichtlich des zu tragenden Gesamtrisikos erreicht. Durch ein nachvollziehbares Aggregieren können die Hauptrisiken im Projekt analysiert und überlegt werden, mit welchen Maßnahmen diesen begegnet werden kann.

Nachdem die frühe Fabrikplanung den Ausgangspunkt der Angebotslegung darstellt und die Angebote für zukünftige Projekte eine Lebensader von Auftragsfertigern bilden, wird eine sehr hohe Qualität des Ergebnisses gefordert, wobei die Zeit durch den potentiellen Kunden oftmals stark begrenzt wird. Die Anforderung besteht also in einer Methode mit hohem Detaillierungslevel, aber kurzem Zeitbedarf in der Anwendung, woraus ein grundlegender Zielkonflikt ableitbar ist, der im jeweiligen Anwendungsfall spezifisch gelöst werden muss. Zusätzlich wird eine Flexibilität hinsichtlich atypischer Produkte und Projekte gewünscht, denen zwar ein erhöhter Zeitbedarf eingeräumt wird, die aber dennoch mit dieser Methode abgedeckt werden sollen.

Abbildung 2.14 bietet einen Überblick über die grundlegenden Anforderungen der frühen Fabrikplanung an die Vorkalkulationsmethoden.

Bewertung der Erfüllung der Anforderungen durch die Kalkulationsmethoden

Zur Bewertung der Kalkulationsmethoden können die nachfolgend angeführten 4 übergreifenden Kriterien hervorgehoben werden, durch deren Nicht-Erfüllung spezifische Methoden und deren detaillierte Betrachtung von vornherein ausgeschlossen werden können. Bei den anderen Kriterien besteht die Möglichkeit, die Nachteile durch geschickte Methodenentwicklung zu verringern oder auszugleichen.

- Geringe Subjektivität in der Anwendung
- Flexibilität bezüglich atypischer Projekte
- Nachvollziehbarkeit der Planungstätigkeiten
- Berücksichtigung von Unsicherheiten in der Planung

Durch eine hohe Subjektivität in der Anwendung der Methode, die das Wissen des Experten in den Vordergrund stellt, kann eine Wiederholbarkeit der Planung nicht garantiert werden. Das Ermitteln von möglichst ähnlichen Ergebnissen bei gleichen Inputparametern ist jedoch eine Grundvoraussetzung für eine abgesicherte Kalkulationsmethodik. Weiters besteht die Anforderung, dass die Methodik auch Ergebnisse für neuartige, atypische Projekte ermitteln kann und der Aufwand für die Adaption sich in einem überschaubaren

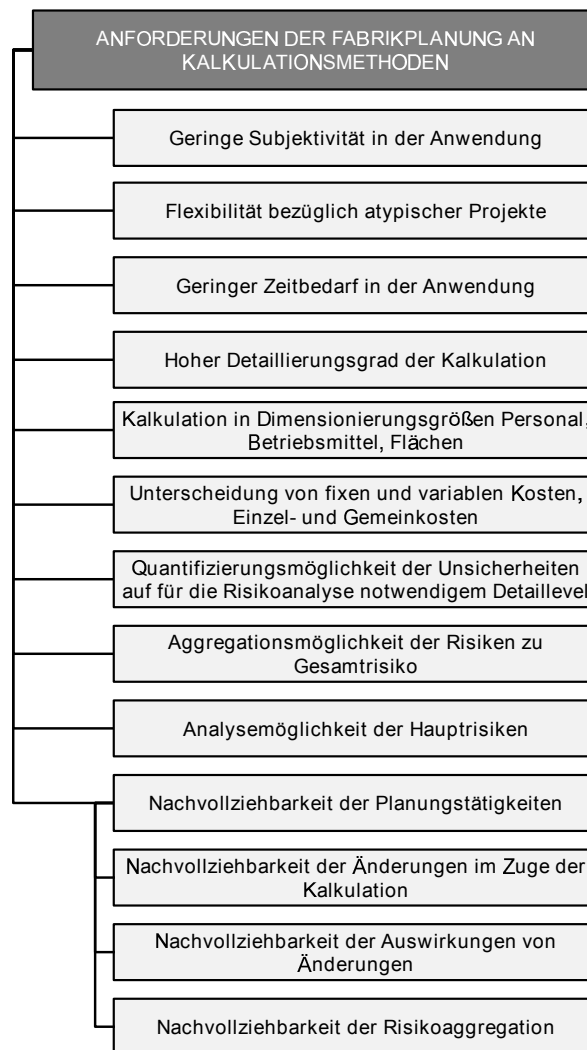


Abb. 2.14: Anforderungen der Fabrikplanung an die Methoden der Vorkalkulation von Kosten

Rahmen bewegt. Das dritte Kriterium besteht in der Nachvollziehbarkeit im Zuge der Planung, wodurch Entscheidungsträger die Ergebnisse der Kalkulation beurteilen können und abgeschlossene Kalkulationen als Grundlage für neue herangezogen werden können. Zuletzt muss der Anwender durch die Methode fähig sein, die Unsicherheiten, die im Zuge der frühen Planungsphase oftmals auftreten, zu definieren und ein Ergebnis unter Berücksichtigung dieser Unsicherheiten zu ermitteln. Generell steht bei der vorliegenden Betrachtung im Vordergrund, ob Unsicherheiten berücksichtigt werden, beziehungsweise ob die Methode erweiterbar ist, damit Unsicherheiten einbezogen werden können, wobei keine großen Nachteile entstehen sollen.

Niazi et al. (2006) schlagen vor, aufgrund der Unsicherheiten in der frühen Phase auf qualitative Methoden zurückzugreifen, die von ihren Grundlagen her relativ einfach mit wenig Informationen auskommen. Jedoch werden stochastische Methoden und deren Potential in Ausführung nach Niazi et al. (2006) als Teil der quantitativen Kalkulationsmethoden nicht berücksichtigt. Qualitative Methoden bieten Einschränkungen hinsichtlich einer hohen Abhängigkeit von der Vergangenheit, einem hohen Zeitbedarf der Anwendung, Subjektivität durch die Abhängigkeit vom Kalkulationsexperten und Black-Box Programmcodes ohne beziehungsweise mit geringer Nachvollziehbarkeit des Ergebnisses (vgl. Niazi et al. (2006, S. 570)). Zusätzlich bieten diese Methoden nicht den erforderlichen Detaillierungsgrad. All diese Gründe stehen im starken Kontrast zu den Anforderungen im Zuge einer frühen Phase der Fabrikplanung als Basis für die Angebotslegung, weshalb die qualitativen Methoden Expertenschätzung, Kostenkalkulation auf Basis von Fuzzylogik, von künstlicher Intelligenz, von der PERT/Cost Methode und von Regressionsanalysen den hier gestellten Anforderungen nicht genügen.

Die qualitativen Methoden Expertensystem und analogiebasierende Kostenkalkulation bieten zwar die Möglichkeit, die Subjektivität aufgrund von entwickelten Regeln und Zusammenhängen bezüglich der Nutzung von historischen Daten zu verringern, besitzen aber den Nachteil einer aufwändigen, unflexiblen Regelerstellung. Im Fall dieser zwei Methoden führen die Subjektivität und die Flexibilität zu einem Zielkonflikt, wobei je nach Auslegung entweder das eine oder andere Kriterium stärker vermindert wird. Eine Nachvollziehbarkeit der Unsicherheiten fehlt dabei. Dadurch kommen diese Methoden als Lösungsmöglichkeiten für die hier gestellten Anforderungen nicht in Frage.

Für die frühe Phase der Fabrikplanung halten Souchoroukov (2004) und Duverlie & Castelain (1999) neben den bereits betrachteten analogiebasierten auch parametrische Kalkulationsmethode für besonders gut geeignet. Parametrische Methoden bieten zwar die Grundlage, für die Planungsfälle, wofür die Kostentreiber analysiert wurden, schnell Ergebnisse zu liefern, jedoch werden Unsicherheiten nicht betrachtet. Gerade wenn aufgrund von Unsicherheiten nicht alle notwendigen Parameter vorhanden sind, müssen diese durch Annahmen geschaffen werden, wobei eine systematische Dokumentierbarkeit fehlt. Ebenfalls zeigen die parametrischen Kalkulationsmethoden Schwächen, wenn

atypische Projekte geplant werden. Parametrische Methoden bieten jedoch das Potential, an neue Gegebenheiten aufgrund der Nachvollziehbarkeit der notwendigen Dimensionierungen und damit der Kosten angepasst zu werden.

Eine Detailkostenkalkulation benötigt einen hohen zeitlichen und personellen Bedarf zur Erstellung, bietet jedoch nachvollziehbar eine Kostenkalkulation auf verschiedenen Aggregationsstufen. Zusätzlich kann diese Methode an beliebig gestaltete, neuartige Projekte angepasst werden und hat geringen Bedarf an historischen Daten. Dennoch werden für die Planung Experten benötigt, da diese im Detail die Fabrik dimensionieren. Die erwähnte Methode bietet aber keine Möglichkeit, Unsicherheiten zu berücksichtigen. Vielmehr müssen aufgrund der hohen Planungstiefe viele Annahmen hinsichtlich der Produkt- und Produktinformationen getroffen werden, die in dieser Phase noch nicht vorhanden sind. Es besteht hierbei keine Möglichkeit, die Annahmen zu dokumentieren und das Risiko durch die Unsicherheiten zu quantifizieren.

Chou (2011) erkennt eine hohe Anwendbarkeit von stochastischen Methoden, die es einerseits ermöglichen, mit Unsicherheiten umzugehen und dem Anwender dadurch Risiken zu vermitteln, andererseits in ihrer Anwendung Flexibilität, einen überschaubaren zusätzlichen Zeitbedarf bei der Kalkulation und eine nachvollziehbare Kostenaggregation bieten. Der stochastische Ansatz bietet Potential, Unsicherheiten abzudecken, jedoch genügt dies allein nicht, um eine Vorkalkulation durchzuführen. Im Zuge von Planungen muss die Fabrik immer noch dimensioniert werden, jedoch steht mit dem stochastischen Ansatz eine Methode zur Verfügung, die zusätzlich Unsicherheiten in der Kalkulation berücksichtigt.

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Weg zu finden, Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung zu quantifizieren, jedoch mit der entwickelten Methode bereits bestehende Kalkulationsmethoden nicht einzuschränken und den hier beschriebenen grundsätzlichen Anforderungen ebenfalls zu genügen. Die Methode zur Berücksichtigung von Unsicherheiten wird jedoch als Ergänzung zu den bestehenden Vorkalkulationsmethoden gesehen, wobei diese möglichst einfach in die Methoden mit dem höchsten Potential, die Detailkostenkalkulation und die parametrische Kostenkalkulation, integrierbar sein soll. Mit der stochastischen Kostenkalkulation ist im Gegensatz zu einem extra aufzubauenden Bayesschen Netz eine einfache Möglichkeit gegeben, deren Anwendbarkeit im Folgenden näher detailliert und untersucht wird.

In der Grafik 2.15 werden die Beurteilungen für die Anwendbarkeit hinsichtlich der in dieser Arbeit erhobenen Anforderungen und Gründe je Kalkulationsmethode in einem Überblick dargestellt. Die Beurteilungen werden qualitativ in „beschränkt geeignet“ und „generell geeignet“ unterschieden. Eine beschränkte Eignung definiert dabei das Potential zum Einsatz dieser Methode mit großen Schwächen, während die generelle Eignung einen Einsatz ohne große Schwächen beziehungsweise die Eignung mit großen Schwächen, die durch Ergänzungen reduziert werden können, beschreibt.

KALKULATIONSMETHODE	Grund					
	Beurteilung	Nachvollziehbarkeit	Objektivität	Flexibilität	Unsicherheitsberücksichtigung	Zusatzinformation
Expertenschätzung	beschränkt geeignet	gering	gering	hoch	Integration möglich	Unstrukturiertheit
Expertensystem	beschränkt geeignet	gering	gering	hoch	vorhanden	Strukturiertheit
Analogiebasierende Kostenkalkulation	beschränkt geeignet	vorhanden	hoch	vorhanden	vorhanden	Abhängigkeit von historischen Daten
Parametrische Kostenkalkulation	generell geeignet	vorhanden	hoch	gering	Integration möglich	einfache, schnelle Anwendung
Detailkostenkalkulation	generell geeignet	hoch	hoch	hoch	Integration möglich	zeitintensive Methode
Stochastische Kostenkalkulation	generell geeignet	hoch	hoch	hoch	hoch	Abhängigkeitsuntersuchungen notwendig
Kostenkalkulation auf Basis von Fuzzylogik	generell geeignet	gering	hoch	hoch	hoch	hoher Erstellungsaufwand
Kostenkalkulation auf Basis von künstlicher Intelligenz	beschränkt geeignet	gering	hoch	hoch	vorhanden	Abhängigkeit von historischen Daten
Kostenkalkulation auf Basis von Regressionsanalysen	beschränkt geeignet	gering	vorhanden	gering	Integration möglich	Abhängigkeit von historischen Daten
Kostenkalkulation auf Basis von PERT/Cost	beschränkt geeignet	gering	hoch	gering	vorhanden	Fokussierung auf kritischen Pfad
Kostenkalkulation auf Basis von Bayesischen Netzen	generell geeignet	hoch	hoch	vorhanden	vorhanden	hoher Erstellungsaufwand

Abb. 2.15: Übersicht über Erfüllung der Anforderung der frühen Fabrikplanungsphase durch die unterschiedlichen Methoden zur Vorkalkulation von Kosten basierend auf der Literaturstudie dieser Arbeit

Zusammenfassung der für diese Arbeit bedeutenden Literatur der Angebotslegung

Die Vorkalkulationsmethoden im Zuge der Angebotslegung besitzen einen besonderen Einfluss auf diese Arbeit. Vor allem die Analysen dieser Methoden durch Chou (2011), Rimpau (2010), Niazi et al. (2006) und Souchoroukov (2004) bieten einen Ausgangspunkt für die weiterführende Forschung. Die Analyse der Methoden ergibt, dass die stochastische Kalkulationsmethode besonderes Potential besitzt, um mit Unsicherheiten in der Planung umgehen zu können. Im Hinblick auf diese Methode sind vor allem die Quelle Deutsch (2008) und diverse Veröffentlichungen von Touran (vgl. Touran (2014), Touran & Suphot (1997), Touran (1993) und Touran & Wisser (1992)) von großer Bedeutung.

2.5 Risikomanagement

2.5.1 Der Risikobegriff

Der Begriff Risiko wird in Unternehmungen und im Zuge derer Tätigkeiten nicht einheitlich verwendet. Im Folgenden wird versucht, die Begriffe Risiko und Risikomanagement anhand von ausgewählten Definitionen der Literatur für diese Arbeit zu präzisieren. Ausgehend von einer unbekanntem Zukunft definiert Raftery (1994, S. 5) Risiko als abstraktes Konzept, das schwierig zu beschreiben und nicht präzise zu messen ist. Er geht im Zuge seiner Definition von Businessentscheidungen aus, die für die Zukunft auf Basis von Annahmen, Erwartungen und Schätzungen getroffen werden. Das Risiko definiert hierbei die Möglichkeit, dass die tatsächlichen Ergebnisse von den geschätzten oder angenommenen Ergebnissen abweichen (vgl. Raftery (1994, S. 5)). Die Abweichung kann hierbei in beide Richtungen gehen (vgl. Raftery (1994, S. 5)). Es können somit bessere oder schlechtere Ergebnisse erreicht werden, wobei die Beurteilung ob besser oder schlechter im Auge des Betrachters liegt. Ebenfalls existieren Definitionen, die Risiko nur mit dem potentiellen Verlust beschreiben und für den potentiellen Gewinn einen eigenen Begriff und eine eigene Betrachtung einführen (vgl. Wolke (2013, S. 1) und Rogler (2002, S. 5)). Für die Beurteilung wird hierbei ein Referenzergebnis, also ein Erwartungswert bestimmt, wobei eine negative Abweichung davon als Risiko betrachtet wird (vgl. Glauser (2003, S. 8) und Gleißner & Wolfrum (2001, S. 150)). Man spricht dann vom Risikobegriff im engeren Sinn (vgl. Gleißner & Wolfrum (2001, S. 150)).

In der vorliegenden Arbeit wird die Definition des Risikos mit den sowohl besseren als auch schlechteren Abweichungen gewählt, die in ein einheitliches Modell zusammengeführt werden und eine Interpretation der Gesamtabweichungen als Chance sowie Verlustgefahr in Unternehmenssicht vorbereiten. In Abbildung 2.16 wird dargestellt, dass eine zukünftige Abweichung vom Zielwert sowohl Gefahren als auch Chancen bietet. Man

spricht dabei von Ereignissen, die positive und negative Auswirkungen auslösen (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 41)).

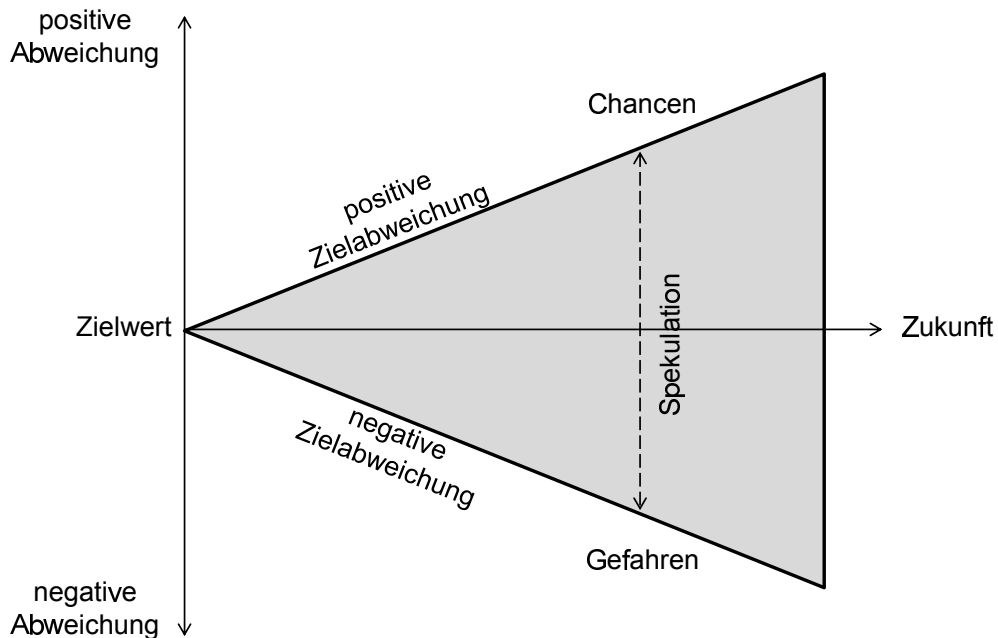


Abb. 2.16: Darstellung der Abweichung vom Zielwert als Gefahr oder Chance (Gleißner & Wolfrum (2001, S. 150))

2.5.2 Unterscheidung von Unsicherheit und Risiko

Unsicherheit ist ein fundamentaler Fakt im Leben. Sie ist ein essentieller Bestandteil sowohl bei Geschäftsentscheidungen als auch bei Entscheidungen in allen anderen Bereichen (vgl. Knight (1921, S. 187)). Laux et al. (2012, S. 81) definieren zusätzlich, dass in der Realität die entscheidungsrelevanten Daten grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet sind. Knight definierte als Basis für die moderne Wirtschaftstheorie die Begriffe Unsicherheit und Risiko in seiner Dissertation 1921. Diese Definition ist ebenfalls für das Verständnis dieser Arbeit von enormer Bedeutung. Er unterscheidet Unsicherheiten, die quantitativ beschrieben werden können und solche, bei denen dies nicht möglich ist (vgl. Abbildung 2.17). Quantitative, also messbare, Unsicherheiten bezeichnet er mit dem Begriff Risiko und nicht-quantitative werden als die „wahren“ Unsicherheiten definiert (vgl. Knight (1921, S. 9)). Diese wahre Unsicherheit wird in der Literatur auch als Ungewissheit bezeichnet (vgl. Bamberg et al. (2012, S. 109)). Für ungewisse Situationen sind die Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von relevanten Zuständen unbekannt (vgl. Bamberg et al. (2012, S. 109)). Diese Unterscheidung nach Knight wird im Zuge dieser Arbeit verwendet, obwohl in der Literatur auch andere Definitionen verwendet werden beziehungsweise die Abgrenzung der Begriffe Unsicherheit, Ungewissheit, Unwissen, Unkenntnis

und Risiko unterschiedlich getroffen wird. Unwissen und Unkenntnis vervollständigen dabei vielfach das Modell der Unsicherheiten um Phänomene, über die der Betrachter keine Kenntnis besitzt oder von denen er nicht einmal weiß, dass diese existieren (vgl. Bamberg et al. (2012, S. 21 f.)). Zschorn (2007, S. 11 f.) bietet hierfür einen umfassenden Überblick.

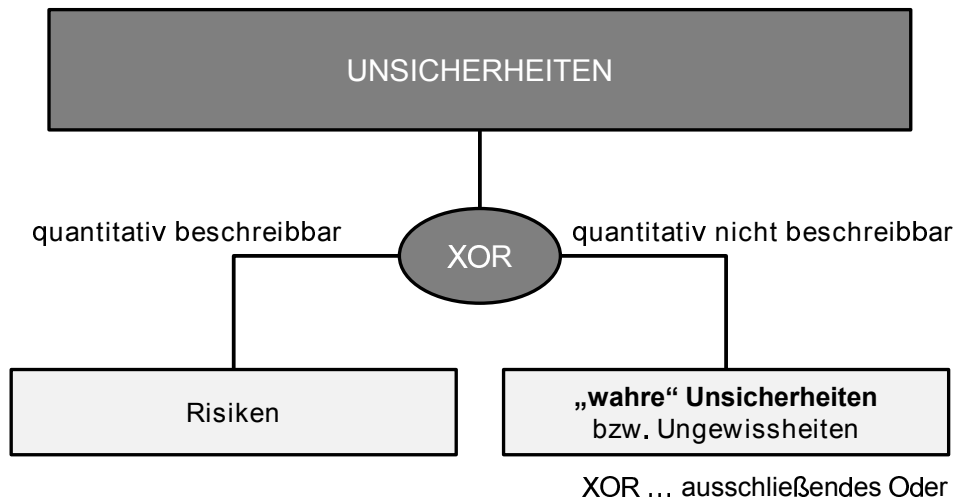


Abb. 2.17: Unterscheidung der Unsicherheiten in Risiken und „wahre“ Unsicherheiten beziehungsweise Ungewissheiten (vgl. Knight (1921, S. 9))

Modelle der unterschiedlichen Wissenschaften stellen grundsätzlich ein Abbild der Wirklichkeit dar und beinhalten Vereinfachungen von Faktoren, die als nicht essentiell erachtet oder nur sehr schwierig abbildbar sind. Je nach Anforderung an das Modell enthält dieses mehr oder weniger Vereinfachungen. Jede Vereinfachung im Modell an sich führt zu einer Unsicherheit, die, wenn eine Quantifizierung möglich ist, in ein Risiko übergeleitet wird. Über diese Quantifizierung ist eine Vorhersage des Ergebnisses nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit möglich. Bei einer hohen Anzahl an Fällen kommt dabei die Prognose der Wirklichkeit nahe (vgl. Knight (1921, S. 22)). Grundvoraussetzung für keinen Fehler ist jedoch die realistische Quantifizierung der Unsicherheit. Es besteht nun in der Planungsphase die Herausforderung, eine geeignete Methode zu wählen, um diese Unsicherheiten zu beschreiben. Die Beschreibung der Unsicherheiten unterstützt das Unternehmen, diese messbar zu machen und somit bewusste Risiken zu definieren. Der Begriff Risiko wird nach dieser Definition neutral verwendet, oft ist jedoch eine Unterscheidung der modellierten Unsicherheiten in Chancen und Risiken üblich, aber von der Definition aus nicht notwendig (vgl. Blum (2001, S. 410) und Rogler (2002, S. 5)).

In der Wissenschaft sind zwei Methoden zur Ermittlung von Zusammenhängen etabliert. Die deduktive Methode geht von einer Theorie und deren Gesetzen aus und schließt auf die speziellen Zusammenhänge im Anwendungsfall (vgl. Töpfer (2009, S. 131)). Die Induktion geht den umgekehrten Weg und schließt von einem beobachteten Phänomen auf eine allgemeine Theorie (vgl. Töpfer (2009, S. 131)). Wird eine dieser Methoden zur

Beschreibung von Unsicherheiten angewendet und ist erfolgreich, dann kann eine Unsicherheit in ein quantifizierbares Risiko konvertiert werden. Dieses Risiko ist in weiterer Folge die Grundlage für darauf folgende Entscheidungen.

Planungstätigkeiten beziehen sich auf die Zukunft und sind schon alleine deswegen mit Unsicherheiten behaftet (vgl. Schwaiger (2013, S. 220)). Die frühe Planungsphase zeichnet sich mit einigen Besonderheiten aus, die maßgeblich die Unsicherheiten beeinflussen. Aufgrund der begrenzten Zeit in dieser Phase müssen notwendigerweise einige Vereinfachungen im Planungsmodell getroffen werden, die erst in späteren Phasen detailliert werden. Gleichzeitig sind nicht immer exakte Werte für Inputfaktoren des Planungsmodells bei Planungsbeginn vorhanden. Zusätzlich muss bei diesem Planungsprozess von einem Prozess mit einer Verstärkung der Unsicherheiten der Planungsbedingungen ausgegangen werden, je weiter in die Zukunft geplant wird (vgl. Grundig (2013, S. 14)). Die Planungsbedingungen dienen als Inputfaktoren, den sogenannten Prämissen, für die Fabrikplanung. Viele Prämissen besitzen unter dem Aspekt der Modellierung stochastischen Charakter (vgl. Grundig (2013, S. 14)).

2.5.3 Definition von Risikomanagement

Risikomanagement oder auch Risk Management beschreibt die operative Tätigkeit zur Handhabung von Risiken (vgl. Romeike (2004, S. 114 f.)). Rogler (2002, S. 29) sieht dabei die Aufgabe des Risikomanagements, alle möglichen sowie vorhandenen Risiken, die ein Unternehmen betreffen, zu steuern, um letztendlich die Ziele des Unternehmens positiv zu beeinflussen. Historisch ging das Risikomanagement von einem versicherbaren Risiko aus, wurde jedoch auch auf nicht versicherbare beziehungsweise spekulative Risiken erweitert (vgl. Rogler (2002, S. 20)). Versicherbare Risiken werden maßgeblich von der Verlustgefahr beeinflusst. Spekulative Risiken hingegen bieten sowohl eine Verlustgefahr als auch eine Gewinnchance (vgl. Rogler (2002, S. 20 f.)). Aufgrund der in dieser Arbeit erfolgten Definition des Risikos als mögliche positive sowie negative Abweichung von einem Erwartungswert, kann auch die erweiterte Definition des Risikomanagements in Konsequenz verwendet werden.

Prozessschritte des Risikomanagements

Vielfach werden übergeordnete Prozessschritte beschrieben, die die Tätigkeiten im Risikomanagement unterteilen und dadurch einen Überblick vermitteln (vgl. unter anderen Romeike (2004, S. 115), Rogler (2002, S. 29), Reh (2001, S. 33), Mott (2001, S. 201) und Gleißner & Meier (2001, S. 55 f.)). Auch wenn die Einteilungen unterschiedliche Kategorien vorsehen, werden dennoch die Haupttätigkeiten fast vollständig in jeder Beschreibung

wiedergefunden, wobei jeder Autor andere Schwerpunkte setzt. Rogler (2002, S. 29) definiert lediglich drei Hauptschritte, die jedoch eine gute Basis für diese Arbeit bieten und in Abbildung 2.18 dargestellt werden.

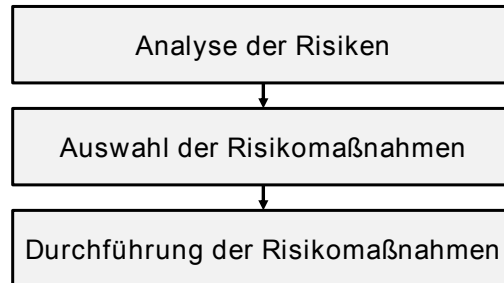


Abb. 2.18: Grundlegende Prozessschritte des Risikomanagements (eigene Darstellung in Anlehnung an Rogler (2002, S. 29))

Mit diesen drei Schritten wird eine sehr umfassende Definition des Risikomanagements gewählt. Ausgehend von einer Identifizierung der Risiken werden diese im ersten Schritt quantifiziert und für verschiedene Sichten und Detaillierungsstufen aggregiert (vgl. Romeike (2004, S. 135) und Rogler (2002, S. 29 ff.)). Basierend auf den bewerteten Risiken in verschiedenen Aggregationsstufen werden geeignete Risikomaßnahmen identifiziert. Abschließend erfolgt eine Durchführung der Maßnahmen, wobei dieser Schritt von der Realisation bis zur Kontrolle der Zielerreichung führt (vgl. Rogler (2002, S. 31 f.)). Diese drei Schritte basieren alle auf einem strategischen Risikomanagement des Unternehmens, in dem definiert wird, welche grundlegende Einstellung zum Risiko im Unternehmen vorhanden sein soll (vgl. Romeike (2004, S. 135)).

Die Basis des Risikomanagement-Prozesses wird durch die Risikoidentifikation gelegt. Sie dient dazu, alle auf das Unternehmen wirkenden Einzelrisiken zu identifizieren und quantifizieren (vgl. Gleißner & Meier (2001, S. 56)). Gleißner (2001, S. 112 ff.) und Romeike (2004, S. 109) verweisen dabei auf spezifische Identifizierungsmethoden, die einen umfassenden Blick ermöglichen sollen. Grundlegend kann man hierbei Kollektionsmethoden (beispielsweise Checklisten) zum Sammeln offensichtlicher Risiken und Suchmethoden zur Identifikation unbekannter Risiken (beispielsweise Fragebögen oder Brainstorming) unterscheiden (vgl. Romeike (2004, S. 109)). Um eine strukturierte und effiziente Risikoidentifikation zu gewährleisten, ist es zielführend, Abbruchkriterien einzuführen (vgl. Gleißner (2001, S. 114)). Diese Kriterien definieren dann Grenzen, bei denen die Suche nach Risiken beendet wird, da eine adäquate Auswahl an Risiken als gefunden angenommen wird.

Durch die Bewertung der Risiken werden diese messbar. Für diese Quantifizierung sind die Größen der möglichen Abweichung, die Wahrscheinlichkeit des Eintritts und die Auswirkungen von Bedeutung (vgl. Rogler (2002, S. 30)). Mit diesen Größen kann eine übersichtliche Hierarchisierung anhand eines Wahrscheinlichkeits-Auswirkungsdiagramms

mit den identifizierten Risiken getroffen werden, wie in Abbildung 2.19 ersichtlich ist (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004a, S. 17)). Diese Darstellung ist unter anderem dafür verwendbar, die Risikoneigung des Unternehmens abzubilden.

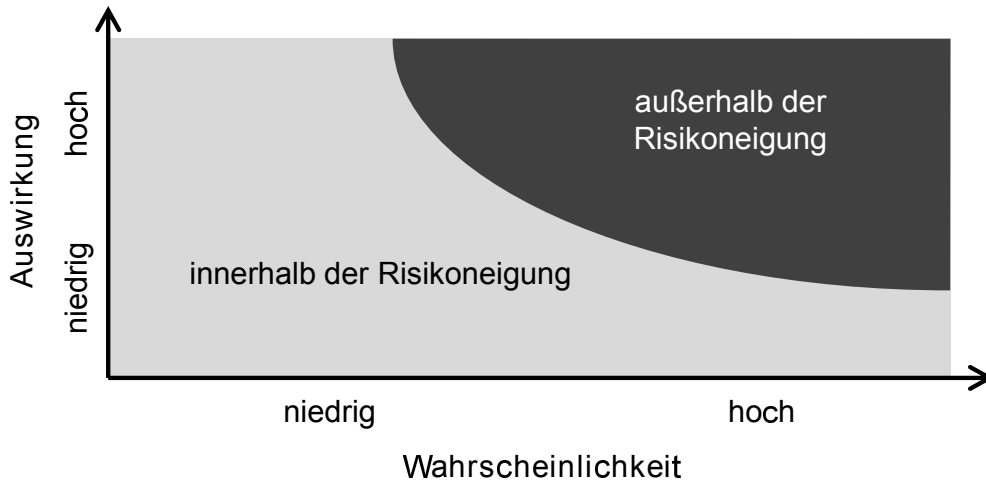


Abb. 2.19: Einteilungsmöglichkeiten der Risiken in deren Auswirkung und Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung der Risikoneigung des Unternehmens (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004a, S. 17))

Werden Größen bewertet, die sich in Zukunft verändern werden, ist eine Trennung in eine erwartete und eine unerwartete Komponente oft hilfreich (vgl. Gleißner (2001, S. 124)). Das Ausmaß der unerwarteten Komponente entspricht hierbei dem Risiko. Die Methoden zur Bewertung können grundlegend in Top-Down und Bottom-Up Ansätze sowie in quantitative und qualitative Methoden unterschieden werden (vgl. Romeike (2004, S. 104)). Die Top-Down Ansätze gehen dabei von einem Übersichtswert oder einer Gesamtzahl für das Unternehmen aus und beziehen sich auf die Folgen der Risiken, während Bottom-Up Ansätze die Ursachen der Risiken in den Mittelpunkt stellen und Detailuntersuchungen der Risiken und deren Abhängigkeiten voraussetzen (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 120 ff.) und Romeike (2004, S. 103 ff.)). Die Aggregation der Detailergebnisse bietet dabei besondere Herausforderungen im Hinblick auf Korrelationen und Abhängigkeiten der Einzelrisiken untereinander (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 120)). Qualitative Methoden beruhen hauptsächlich auf subjektiven Beurteilungen, wobei oftmals historische Daten für eine genauere Bewertung der Risiken fehlen, und bieten als Ergebnis eine Beschreibung und Interpretation der Risiken (vgl. Romeike (2004, S. 105)). Hingegen führen quantitative Methoden zu einem mathematisch beschriebenen Ergebnis, das vielfach auf historischen Daten und Expertenschätzungen basiert (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 121)).

Zur Auswahl der Risikomaßnahmen ist vielfach die Definition von Schwellwerten hilfreich, die festlegen, bei welcher Ausprägung des bewerteten Risikos eine Warnung ausgespro-

chen wird, und im nächsten Schritt, ob steuernde Maßnahmen erforderlich sind (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 111 f.)). Die Risikomaßnahmen basieren dabei auf grundlegenden Risikostrategien, die in Kapitel 2.5.3 beschrieben werden. Um eine Entscheidung für eine spezifische Risikomaßnahme treffen zu können, ist es notwendig, alle möglichen Maßnahmen bezüglich der damit verbundenen Kosten und der Verminderung der möglichen Gefahren zu bewerten (vgl. Rogler (2002, S. 31)).

Abschließend erfolgt die Durchführung der ausgewählten Risikomaßnahme, die neben der Realisation auch eine Kontrolle der Zielerreichung beinhaltet (vgl. Rogler (2002, S. 31)). Hierbei wird die Einhaltung der Maßnahme überwacht und diese regelmäßig hinsichtlich der Angemessenheit, Effizienz und Wirksamkeit überprüft (vgl. Romeike (2004, S. 112 f.) und Mott (2001, S. 201)). Eine umfangreiche Dokumentation der geplanten, durchgeführten und aktuell umgesetzten Maßnahmen stellt eine Voraussetzung für die Kontrolle dar (vgl. Mott (2001, S. 201)).

Für die Neueinführung von Risikomanagementsystemen bieten sich aufgrund der Merkmale Einmaligkeit, Abgeschlossenheit der Aufgabe und Einbindung verschiedener Mitarbeiter an, dies als eigenständiges Projekt zu betrachten. Die Einführung hat dabei das Ziel, dass das neue System von den Mitarbeitern angenommen und als fortlaufender Prozess geführt werden soll. Somit stellt sich die Integration der Mitarbeiter in den Einführungsprozess als wichtiges Kriterium heraus, da die Mitarbeiter in späterer Folge mit komplexen und für sie neuen Methoden umgehen lernen müssen. (vgl. Reh (2001, S. 27))

Risikoarten und -kategorien

Eine einheitliche Einteilung und Kategorisierung der Risiken existiert nicht (vgl. Glauser (2003, S. 8 f.)). Vielmehr bestehen unterschiedliche Einteilungen, die die Risiken gewissen Kategorien und Gruppen zuweisen (vgl. Zentis & Schmitt (2013, 336 ff.), Kuster et al. (2011, S. 167), Kaiser & Köhne (2007, S. 38 f.), The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 46), Romeike (2004, S. 109 ff.) und Rogler (2002, S. 143)). Vielfach können Risiken jeweils in zwei Gattungen unterschieden werden. Dabei werden interne und externe (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 46) und Romeike (2004, S. 111)), spekulative und reine (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 47)) sowie operationelle Risiken und Finanzrisiken (vgl. Zentis & Schmitt (2013, S. 336 ff.) und Romeike (2004, S. 111)) unterschieden. In Abbildung 2.20 werden diese Einteilungsarten in einem Überblick dargestellt.

Externe Risiken sind solche, die von Ereignissen außerhalb des Unternehmens, wie beispielsweise Naturereignissen oder Gesetzesänderungen ausgelöst werden, während

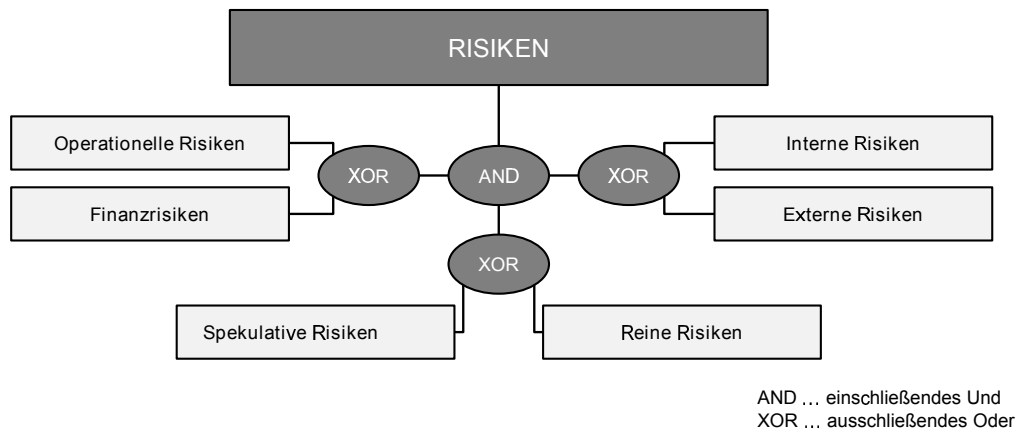


Abb. 2.20: Grundlegende Unterscheidung der Risiken (eigene Darstellung in Anlehnung an Zentis & Schmitt (2013, S. 336 ff.), The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 46 f.) und Romeike (2004, S. 111))

interne durch Ereignisse innerhalb des Unternehmens, wie beispielsweise Produktionsprozessfehler oder Unfälle am Arbeitsplatz, beeinflusst werden (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 41 f.)). Reine Risiken beinhalten nur Gefahren und keine Chancen, im Gegensatz dazu bieten spekulative Risiken sowohl die Möglichkeit einer positiven als auch negativen Zielabweichung (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 47)). Eine Unterscheidung in Finanzrisiken und operationelle Risiken bietet den Vorteil, eine Abtrennung der Risiken einzuführen, die zum einen sich nur auf Finanzwirtschaft beziehen und zum anderen das Unternehmen bei der Erbringung der Leistung stören (vgl. Romeike (2004, S. 111)).

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Risikoereignissen, die unterschiedlich kategorisiert werden und von einer „Myriade“ an internen und externen Faktoren beeinflusst werden (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 45)). Die oftmals vorhandenen Checklisten zur Risikoidentifizierung, basierend auf gewissen Risikokategorien, können ebenfalls nur eine Leitlinie bieten und keine vollständige Übersicht (vgl. Gleißner (2001, S. 114 f.)). Rogler (2002, S. 9 ff.) definiert zur Kategorisierung von Risiken acht generische Kriterien, die eine wichtige Stütze zur Einteilung darstellen: Messbarkeit, Höhe, Ursachen, Wirkung, Beeinflussbarkeit, Abwälzbarkeit, Versicherbarkeit und kalkulatorische Behandlung.

Grundlegende Maßnahmen des Risikomanagements

Ebenso wie bei den Risikokategorien gibt es eine Vielzahl an möglichen Einteilungsformen für grundlegende Maßnahmen des Risikomanagements (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 58), Romeike (2004, S. 116), Rogler (2002, S. 21 ff.) und Gleißner (2001, S. 101 ff.)).

Vielfach finden sich vier Grundstrategien zur Begegnung der Risiken, die in Abbildung 2.21 anhand des Wahrscheinlichkeits-Auswirkungsdiagramms dargestellt werden.



Abb. 2.21: Einteilung der grundlegenden Maßnahmen des Risikomanagements (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 59))

Kaiser & Köhne (2007, S. 59) trafen eine Auswahlempfehlung der Maßnahmen anhand der Wahrscheinlichkeit und der Auswirkung des Risikos. Ist die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses, welches ein Risiko in sich birgt, hoch, die Auswirkung jedoch gering, wird lediglich ein effektives Vermindern der Auswirkungen empfohlen. Treten jedoch womöglich hohe Auswirkungen bei gleich hoher Wahrscheinlichkeit auf, so bietet ein Vermeiden des Risikos an sich ein großes Potential, wobei hierfür vielfach ein höherer Aufwand zur Maßnahmenumsetzung investiert werden muss. Bei einer niedrigen Eintrittswahrscheinlichkeit mit hohen Auswirkungen eines Ereignisses bietet beispielsweise der Abschluss einer Versicherung mit einer definitiven Prämie eine wirtschaftliche Maßnahme, sich vor diesem Risiko durch ein Transferieren abzusichern. Sind sowohl die Auswirkungen als auch die Wahrscheinlichkeit niedrig, kann ein einfaches Akzeptieren des Risikos die wirtschaftlichste Alternative sein. Generell sind jedoch die Grenzen nicht eindeutig definiert und müssen fallspezifisch analysiert und interpretiert werden. (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 56 ff.))

Rogler (2002, S. 25) definierte, dass Maßnahmen zur Vermeidung aller Risiken nicht möglich sind, da ein unternehmerisches Handeln ein Handeln unter Risiko per se darstellt. Zusätzlich existieren grundlegende Risikoeinstellungen, die in die drei Typen risikofreudig, risikoneutral und risikoavers eingeteilt werden können (vgl. Kruschwitz (2011, S. 293)). Man spricht dabei von risikoavers, wenn sich eine Person bei der Wahl zwischen einer riskanten und einer sicheren Alternative für die sichere entscheidet (vgl. Laux et al. (2012, S. 92 f.)). Eine risikofreudige Person entscheidet sich für die riskante Alternative, bei Risikoneutralität lässt sich keine Tendenz zu einer Entscheidung feststellen (vgl. Laux et al. (2012, S. 92 f.)).

2.5.4 Schnittstelle des Risikomanagements mit der frühen Fabrikplanung und Angebotslegung

Generell bietet die Risikoanalyse einen logisch strukturierten Ansatz zur Quantifizierung von Unsicherheiten im Hinblick auf Kosten, Zeit und technische Erfüllung (vgl. Riley (1995, S. 267)). Durch die Quantifizierung wird die Grundlage für ein quantitatives Risikomanagement gelegt. Werden die Risikowerte aggregiert, sind besonders deren Wechselwirkungen zu berücksichtigen, indem mithilfe von statistischen Daten und Simulationswerkzeugen Szenarien mit unterschiedlicher Ausprägung aller für die Risiken des Unternehmens relevanten Faktoren erstellt werden (vgl. Gunkel (2010, S. 76)).

Die frühe Fabrikplanungsphase, die durch die Dimensionierung von Flächen, Personal und Betriebsmitteln gekennzeichnet ist, beinhaltet vielfach Unsicherheiten im Zuge der einzelnen Tätigkeiten. Die Outputwerte der Fabrikplanung dienen als Inputwerte der Angebotslegung, die aber weiterhin Unsicherheiten aufweisen. Durch Anwendung von Quantifizierungsmethoden können die Unsicherheiten zu einem bewerteten Risiko transferiert und in weiterer Folge geeignete Risikomaßnahmen ergriffen werden. Diese Quantifizierung dient als Grundvoraussetzung für eine adäquate Berücksichtigung der Unsicherheiten.

Der Produktionsbereich kann als spezieller Fall des Risikomanagements betrachtet werden, wobei die Risiken im Falle der Herstellung von Gütern, basierend auf dem Transformationsprozess, in drei Kategorien eingeteilt werden können, wie in Abbildung 2.22 ersichtlich ist (vgl. Rogler (2002, S. 143)):

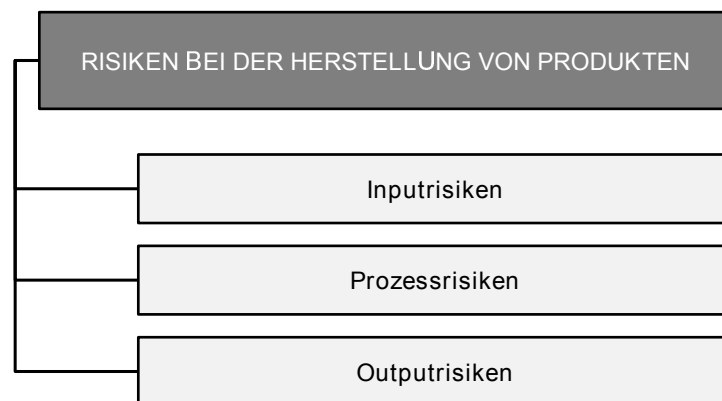


Abb. 2.22: Kategorisierung der Risiken bei der Herstellung von Produkten in Inputrisiken, Prozessrisiken und Outputrisiken (eigene Darstellung in Anlehnung an Rogler (2002, S. 143))

Analog zur Abbildung 2.3 des Transformationsprozesses beziehen sich die Inputrisiken auf die Produktionsfaktoren, die Prozessrisiken auf die Transformation und die Outputrisiken auf die Produkte. Im Zuge einer Fabrikplanung wird besonderer Fokus auf die Input- und Prozessrisiken gelegt. Die Inputgrößen sind dabei als externe Größen nur

über gezielte Kooperationen steuerbar. Prozessrisiken liegen in der Hand des Planers und des Unternehmens und eignen sich besonders gut für alle Risikomaßnahmen, da im Transformationsprozess der Kernbereich des Unternehmens betroffen ist. Nachdem die Anforderungen an das Produkt, wie beispielsweise die Qualitätsanforderungen, als Inputfaktor der Planung gesehen werden und dies in der Planung somit impliziert berücksichtigt ist, beschränkt sich das Modell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung auf die Kategorien Input- und Prozessrisiken.

Die Anforderungen der frühen Fabrikplanung an die Vorkalkulationsmethoden ergeben unter anderem die Forderung nach einem hohen Detaillierungslevel, der die Detailkostenkalkulation sowie die parametrische Kalkulationsmethode als sehr geeignete Methoden darstellt. Für eine Risikobetrachtung bietet sich ebenfalls eine quantitative Methode an, die einen Bottom-Up Ansatz verfolgt. Durch eine Quantifizierung auf einer detaillierten Ebene analog der Vorkalkulation werden Analysemöglichkeiten auf denselben Ebenen geschaffen. In einigen Branchen und Fachgebieten kommen bereits Bottom-Up-Quantifizierungsmethoden zum Einsatz, wofür in Kapitel 2.7 ein Überblick über den Stand der Technik in diesem Bereich gegeben wird. Aufgrund der Anforderungen der frühen Fabrikplanung und der geringen Informationsgüte der Übersichten durch Top-down-Ansätze bleiben diese in der weiteren Arbeit unberücksichtigt (vgl. Romeike (2004, S. 104)).

Eine besondere Bedeutung kommt der Risikobetrachtung bei Produktionsunternehmen mit nur wenigen großen Einzelverträgen zu (vgl. Buch et al. (2011, S. 3002)). Diese Unternehmen besitzen eine hohe Abhängigkeit von der Wirtschaftlichkeit dieser wenigen Verträge. Als Basis für Verträge dient das Angebot, das wiederum auf der frühen Fabrikplanung beruht. Gerät das Unternehmen aufgrund von Konkurrenten oder der allgemeinen Marktsituation zusätzlich unter Preisdruck, steht das Unternehmen vor der hohen Herausforderung, mit geringen Margen und Gesamtrisikoaufschlägen Angebote zu legen. Gerade hier ist für das Unternehmen während der Verhandlung überlebensnotwendig zu wissen, welches Risiko mit welchem verhandelten Preis getragen werden muss. Die Treffsicherheit der Fabrikplanung und -dimensionierung und eine aussagekräftige, detaillierte Risikobewertung bieten die Grundvoraussetzung für langfristiges Bestehen am Markt zu wettbewerbsfähigen Preisen ohne ungeplante Kostensteigerungen. Trotz einer etwas entschärften Situation bei Unternehmen mit ähnlichen Produkten, deren Verkauf durch gleichwertige, kleinere Einzelverträge zustande kommt, ist das Wissen über das Risiko in jedem einzelnen Vertrag eine wichtige Basis für das Fortbestehen des Unternehmens. Die Fehler bei Vorhersagen sind nur bei einer sehr hohen Anzahl der Einzelwerte minimal (vgl. Knight (1921, S. 22)).

Zusammenfassung der für diese Arbeit bedeutenden Literatur des Risikomanagements

Ausgehend von der zentralen Definition von Unsicherheit und Risiko nach Knight (1921) schließt die Forschung dieser Arbeit an der Forderung in den Veröffentlichungen von Gleißner (vgl. beispielsweise Gleißner (2014), Gleißner (2004) und Gleißner (2001)) an, bei Risikoaggregationen ein besonderes Augenmerk auf Korrelationen der Risiken zu legen und diese zu berücksichtigen. Für die grundlegenden Prozesse und Maßnahmen des Risikomanagements werden die Arbeiten von Kaiser & Köhne (2007), Romeike (2004) und Rogler (2002) herangezogen.

2.6 Statistische Methoden

Die mathematische Statistik als die „Lehre von den mathematischen Methoden zur Gewinnung und Auswertung von Statistiken“ (Kreyszig (1979, S. 13)) wird in der Literatur vielfach in die drei Gebiete der deskriptiven oder beschreibenden Statistik, der Wahrscheinlichkeitsrechnung und der induktiven oder schließenden beziehungsweise beurteilenden Statistik unterteilt, wie in Abbildung 2.23 dargestellt wird (vgl. beispielsweise Hartung (2009, S. 16 ff.), Hartung & Elpelt (2007, S. 17), Pruscha (2006, S. 1) und Kreyszig (1979, S. 7 ff.)).

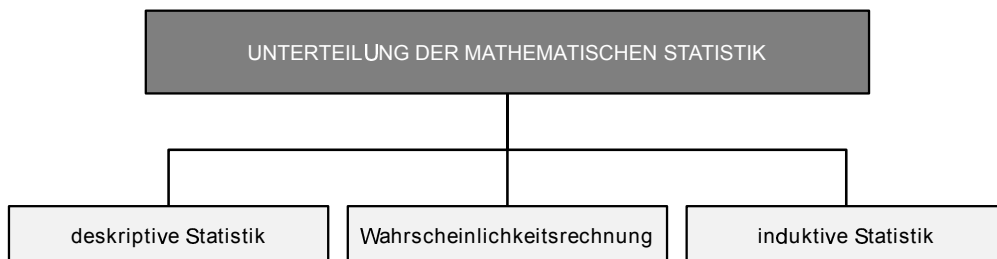


Abb. 2.23: Unterteilung der mathematischen Statistik in deskriptive, induktive Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung (eigene Darstellung in Anlehnung an Hartung (2009, S. 16 ff.), Hartung & Elpelt (2007, S. 17), Pruscha (2006, S. 1) und Kreyszig (1979, S. 7 ff.))

Die deskriptive Statistik setzt sich mit der Beschreibung und Analyse von Daten auseinander, die beispielsweise aufgrund von Befragungen und Messungen vorhanden sind. Zur Beschreibung dienen hierbei Merkmale, die in quantitative und qualitative sowie in stetige und diskrete Merkmale unterschieden werden. Hierbei werden die quantitativen Merkmale in der Größe unterschieden und qualitative in der Art des Auftretens. Während die beliebige Ausprägung der stetigen Merkmale gemessen werden kann, werden diskrete Merkmale gezählt. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 18))

In der Wahrscheinlichkeitsrechnung werden mathematische Modelle aufgestellt, die empirische Sachverhalte der Realität abbilden (vgl. Kreyszig (1979, S. 50)). Im Mittelpunkt der Untersuchungen stehen zufällige Ereignisse (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 25)). Zufallsexperimente und Zufallsbeobachtungen bieten dabei die Grundlage für die Datenerhebung (vgl. Kreyszig (1979, S. 50)).

Gerade in der Praxis sind die für die mathematische Modellierung von zufälligen Ereignissen notwendigen Parameter unbekannt und müssen durch Näherungswerte ersetzt werden (vgl. Kreyszig (1979, S. 167)). Mit der Schätzung der Parameter beschäftigt sich die induktive Statistik (vgl. Kreyszig (1979, S. 167)). Diese Statistik geht davon aus, dass keine vollständige Grundgesamtheit der Daten vorliegt, sondern nur eine Stichprobe (vgl. Bracht et al. (2011, S. 106)). Ausgehend von der Stichprobe wird dabei versucht, auf Gesetzmäßigkeiten zu schließen und die Grundgesamtheit zu schätzen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 106)).

Die mathematische Statistik verwendet einige Grundbegriffe, die im Folgenden in einem Überblick vorgestellt werden. Mit den Begriffen der Grundgesamtheit, Stichprobe und zufälligen Ereignisse sind schon drei wichtige Begriffe in dieser Einleitung erwähnt.

2.6.1 Überblick über die Grundbegriffe der mathematischen Statistik

Grundgesamtheit, Stichprobe und zufällige Ereignisse

Zufällige Ereignisse können im Vorhinein nicht eindeutig bestimmt werden. Zufallsexperimente und Zufallsbeobachtungen können beliebig oft wiederholt werden, wobei das Ergebnis ein zufälliges darstellt (vgl. Kreyszig (1979, S. 50)). Stochastische Ereignisse definieren hierbei solche, die mit Zufallsexperimenten und Wahrscheinlichkeiten einen Zusammenhang besitzen (vgl. Kreyszig (1979, S. 68)). Um den Wahrscheinlichkeitsbegriff in der Statistik zu bestimmen, muss vorab noch der Begriff Häufigkeit erläutert werden.

Die absolute Häufigkeit k für die Ausprägung A eines Merkmals beschreibt dabei die Anzahl im Zuge der Experimente und Beobachtungen, bei der die Ausprägung auftritt. Bei der relativen Häufigkeit $h(A)$ wird die absolute Häufigkeit durch die Gesamtzahl n der Experimente beziehungsweise Beobachtungen geteilt. Die relative Häufigkeit ist also eine reelle, nicht negative Zahl, die minimal 0 und maximal 1 ist. (vgl. Kreyszig (1979, S. 51))

$$h(A) = \frac{k}{n} \tag{2.2}$$

In Analogie zur relativen Häufigkeit wird auch die Wahrscheinlichkeit für eine Merkmalausprägung A als Verhältnis der Anzahl der Fälle g mit Merkmalausprägung A zu der Gesamtzahl der Fälle m definiert (vgl. Kreyszig (1979, S. 55)).

$$P(A) = \frac{g}{m} \quad (2.3)$$

In der Praxis kann in vielen Fällen die Wahrscheinlichkeit einer Merkmalausprägung nicht präzise bestimmt, sondern nur durch Experimente geschätzt werden. Bei großen Versuchsreihen, die wiederholt werden, zeigt sich jedoch die relative Häufigkeit oftmals als nahezu konstant. Man spricht dann von einer Stabilität der relativen Häufigkeit. Es wird somit auf die theoretische Existenz einer Wahrscheinlichkeit P geschlossen, wobei versucht wird, diese mit empirischen relativen Häufigkeiten möglichst genau zu ermitteln. Die Wahrscheinlichkeit bezieht sich somit auf die Grundgesamtheit, die relative Häufigkeit auf die Stichprobe. (vgl. Kreyszig (1979, S. 57 ff.))

Diskrete und stetige Funktionen

Theoretische Modelle der Statistik versuchen möglichst präzise die Grundgesamtheit zu beschreiben. Wahrscheinlichkeiten von Merkmalausprägungen, die zählbar sind, wie beispielsweise Ausschussstücke oder Fahrzeuge, werden mit diskreten Verteilungen beschrieben, während Wahrscheinlichkeiten von Merkmalausprägungen, die messbar sind, wie beispielsweise Zeiten oder Temperaturen, mit stetigen Verteilungen modelliert werden. In diese zwei Klassen von Verteilungen lassen sich die meisten praktischen Probleme von zufälligen Ereignissen einteilen. Die Merkmalausprägung wird dabei als Zufallsvariable bezeichnet. (vgl. Kreyszig (1979, S. 70 ff.))

Mittelwert, Standardabweichung und Varianz

Mittelwert, Standardabweichung und Varianz werden als Maßzahl der Stichprobe X bezeichnet (vgl. Kreyszig (1979, S. 37)). Der Mittelwert stellt dabei den Durchschnitt der Datenwerte dar (vgl. Kreyszig (1999, S. 1053)). Er ist definiert als das arithmetische Mittel der Stichprobenwerte (vgl. Kreyszig (1979, S. 37)).

$$\bar{x} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} = \frac{x_1 + x_1 + \dots + x_n}{n} \quad (2.4)$$

Im Falle einer stetigen Verteilung kann der Mittelwert μ oder Erwartungswert $E(X)$ auch folgendermaßen ausgedrückt werden (vgl. Kreyszig (1999, S. 1075)):

$$\mu = E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx \quad (2.5)$$

Die Streuung der Daten kann hingegen durch die Standardabweichung σ , oder bei ihrer Quadrierung durch die Varianz $Var(X)$ gemessen werden. Die Standardabweichung ist

die nichtnegative Wurzel der Varianz. Im Mittelpunkt der Berechnung stehen dabei die Einzelabweichungen $x_1 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x}$ (vgl. Kreyszig (1999, S. 1053)):

$$\text{Var}(X) = \sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2 \quad (2.6)$$

Für die stetige Verteilung lautet die Formel für die Standardabweichung folgendermaßen (vgl. Kreyszig (1999, S. 1075)):

$$\text{Var}(X) = \sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (2.7)$$

Die folgenden Definitionen beziehen sich auf stetige Funktionen, die im Zuge dieser Arbeit Anwendung finden. Für weiterführende Informationen wird an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen (vgl. beispielsweise Hartung (2009), Hartung & Elpelt (2007), Pruscha (2006), Kreyszig (1999) und Kreyszig (1979)).

Verteilungsfunktion und Dichtefunktion

Für die stetige Zufallsvariable X können die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse $X \leq x$ als Verteilungsfunktion $F_X(x)$ dargestellt werden (vgl. Hartung (2009, S. 104)):

$$F_X(x) = P(X \leq x) \quad (2.8)$$

Ebenfalls kann die Verteilungsfunktion in Integralform dargestellt werden (vgl. Kreyszig (1979, S. 80)):

$$F_X(x) = \int_{-\infty}^x f_X(v) dv \quad (2.9)$$

Der Integrand f heißt Wahrscheinlichkeitsdichte und wird durch die Dichtefunktion beschrieben. Die Verteilung einer Zufallsvariablen wird durch eine Wahrscheinlichkeitsdichte oder Dichtefunktion vollständig bestimmt. (vgl. Kreyszig (1979, S. 81))

Die Verteilungsfunktion an der Stelle x gibt somit die Größe der Fläche an, die zwischen der Abszisse und der Kurve f sowie zwischen $-\infty$ und x liegt. Die Größe dieser Fläche zwischen $-\infty$ und ∞ ist eins und gibt eine 100-prozentige Wahrscheinlichkeit wieder. (vgl. Hartung (2009, S. 106))

2.6.2 Wichtige Verteilungen

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Verteilungen, die Wahrscheinlichkeiten beschreiben. Im Folgenden werden zwei Verteilungen vorgestellt, die für diese Arbeit eine besondere Bedeutung besitzen und in den darauffolgenden Kapiteln verwendet werden.

Gleichverteilung

Die einfachste Art einer Verteilung stellt die stetige Gleichverteilung $U(a, b)$, oder auch als Rechteckverteilung bezeichnet, im Intervall $[a; b]$ dar. Sie beschreibt zufällige Ereignisse von Merkmalausprägungen, deren Auftretenswahrscheinlichkeit außerhalb des Intervalls gleich 0 ist und die innerhalb des Intervalls alle Zahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit einnimmt. Bei der Darstellung der Dichtefunktion der Gleichverteilung bildet die Fläche im Intervall $[a; b]$ und zwischen der Abszisse und der Dichtefunktion ein Rechteck. (vgl. Hartung (2009, S. 192 f.))

$$f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & \text{für } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2.10)$$

In Abbildung 2.24 wird die Dichtefunktion f_X der Gleichverteilung $U(2, 7)$ und in Abbildung 2.25 wird die dazu passende Verteilfunktion F_X dargestellt.

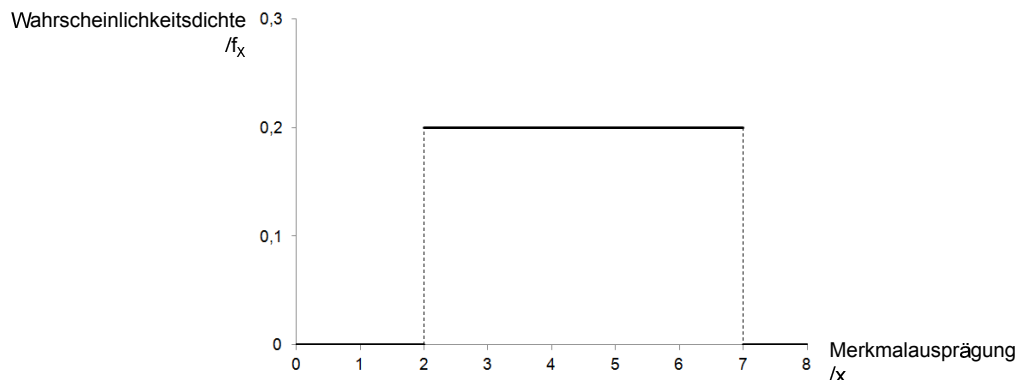


Abb. 2.24: Dichtefunktion f_X der Gleichverteilung $U(2, 7)$ (vgl. Hartung (2009, S. 192))

Normalverteilung

Die Normalverteilung mit ihrer symmetrischen, glockenförmigen Ausprägung der Dichtefunktion besitzt in der Statistik eine große Bedeutung. Viele Merkmalausprägungen besitzen sowohl in der Natur als auch in Anwendungen eine normalverteilte Gestalt. (vgl. Hartung (2009, S. 143 f.))



Abb. 2.25: Verteilfunktion F_X der Gleichverteilung $U(2, 7)$ (vgl. Hartung (2009, S. 192))

Die Dichte der Normalverteilung $N(\mu, \sigma)$ wird durch folgende Funktion beschrieben und beispielhaft in Abbildung 2.26 für die Normalverteilung $N(81, 1)$ dargestellt. Für die Definition der Dichtefunktion genügt also die Angabe vom Mittelwert μ und der Standardabweichung σ . (vgl. Hartung (2009, S. 143))

$$f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.11)$$

Die Standardabweichung stellt dabei die Distanz zwischen dem Mittelwert und dem Wendepunkt der Dichtefunktion dar. Diese Distanz zwischen dem Mittelwert und dem linken sowie rechten Wendepunkt ist aufgrund der Symmetrieeigenschaft der Normalverteilung identisch und entspricht beide Male dem Wert der Standardabweichung.

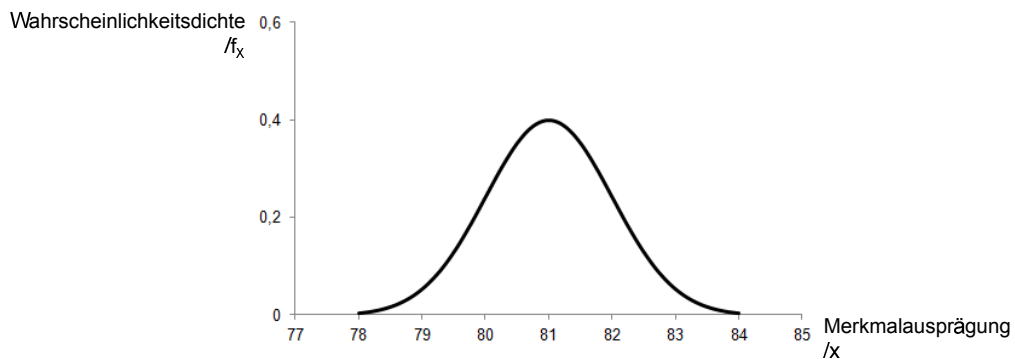


Abb. 2.26: Dichtefunktion f_X der Normalverteilung $N(81, 1)$ (vgl. Hartung (2009, S. 144))

Vielfach wird die Wahrscheinlichkeit von Normalverteilungen für verschiedene Anwendungen in der Praxis in Bereichen abhängig von der Standardabweichung angegeben. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über wichtige Bereiche und deren Wahrscheinlichkeit.

Die Verteilfunktion der Normalverteilung einer Zufallsvariablen X kann im nächsten

Name	Bereich	Wahrscheinlichkeit
1 σ -Bereich	$\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma$	68,27 %
2 σ -Bereich	$\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma$	95,45 %
3 σ -Bereich	$\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma$	99,73 %

Tab. 2.2: Wahrscheinlichkeiten der Normalverteilung in Abhängigkeit von der Standardabweichung (vgl. Hartung (2009, S. 147))

Schritt aufgestellt werden. In Abbildung 2.27 wird diese mit dem gleichen Beispiel wie die Dichtefunktion dargestellt. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 28))

$$F_X(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (2.12)$$

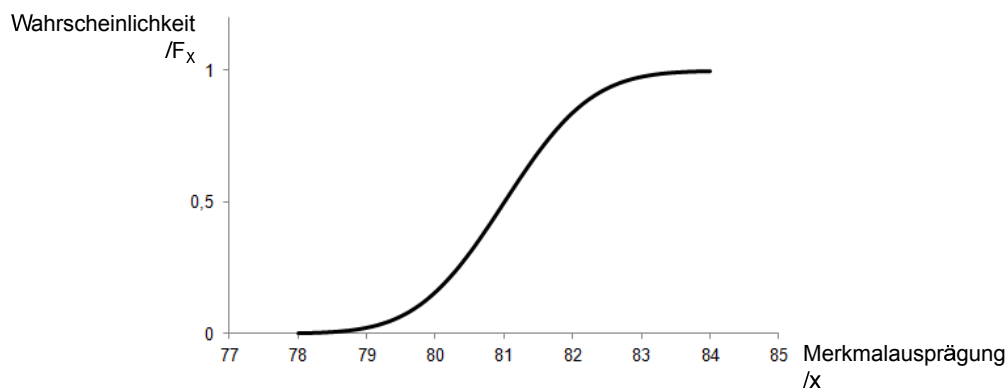


Abb. 2.27: Verteilfunktion f_X der Normalverteilung $N(81, 1)$ mit der Darstellung im Intervall von $\mu - 3\sigma$ (78) bis $\mu + 3\sigma$ (84) (vgl. Hartung (2009, S. 145))

Quantil

Zur Interpretation der Dichtefunktion kann das Quantil herangezogen werden. Das Quantil ξ_P zu einem bestimmten Wahrscheinlichkeitswert P ist allgemein definiert als die Zahl einer Merkmalausprägung. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Merkmalausprägung kleiner als ξ_P ist, ist in diesem Fall gerade P . (Deutsch (2008, S. 362))

Value-at-Risk

In der Finanzmathematik wird ebenfalls der Value-at-Risk (VaR) zur Auswertung von Dichtefunktionen herangezogen. Die Definition dieses Maßes stellt einen Versuch dar, ein spezifisches Risiko anhand einer einzigen Kennziffer darzustellen (vgl. Hull (2012, S. 590)). Durch VaR wird ein Wert der Dichtefunktion ermittelt, der mit einer bestimmten

Konfidenz möglich ist, wobei der VaR als der spezifische Wert mit der wählbaren Konfidenz c definiert wird (vgl. Hull (2012, S. 590)). Diesen Wert bildet ein Quantil ξ_P mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit P (vgl. Deutsch (2008, S. 363)). Bei Finanzinstrumenten erfolgt eine Zusatzangabe für den Zeitraum, für den der mögliche Verlust anfallen kann (vgl. Hull (2012, S. 591)).

Umgelegt auf die Angebotslegung in dieser Arbeit wird für die Wahrscheinlichkeit der Kosten eine Verteilung definiert. Der Value-at-Risk entspricht in der Kostenverteilung dem Wert des Quantils ξ_P mit der Wahrscheinlichkeit P .

2.6.3 Multivariate Statistik

Oftmals ist nicht nur eine Zufallszahl, sondern sind gleichzeitig mehrere Zahlen interessant, beziehungsweise treten in Experimenten verschiedene Merkmalausprägungen als zufällige Ereignisse auf (vgl. Kreyszig (1999, S. 1091)). Werden in der Statistik mehrere Zufallszahlen gleichzeitig betrachtet, spricht man von einer multivariaten Statistik (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 2 f.)).

Die Zufallszahlen können in einem Zufallsvektor \mathbf{X} zusammengefasst werden.

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Summenbildung von Normalverteilungen

Besteht eine Merkmalausprägung aus der Summe von zwei anderen Merkmalausprägungen, dann können folgende Regeln für die Addition von Zufallszahlen angewendet werden (vgl. Kreyszig (1999, S. 1097)).

Der Mittelwert einer Summe von Zufallszahlen ist gleich der Summe der Mittelwerte der Zufallszahlen (vgl. Kreyszig (1999, S. 1097)):

$$E(X_1 + X_2 + \dots X_n) = E(X_1) + E(X_2) + \dots E(X_n) \quad (2.14)$$

Von praktischer Bedeutung ist ebenfalls die Addition der Varianzen. Die Formel der Addition wird anhand von den zwei Zufallszahlen X und Y gezeigt, die zu Z addiert werden. Für den Beweis sei beispielsweise auf Kreyszig (1999, S. 1098) und Hartung & Elpelt (2007, S. 35 f.) verwiesen.

$$\sigma_Z^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + 2\sigma_{XY} \quad (2.15)$$

Der Term σ_{XY} wird hierbei als Kovarianz betrachtet und tritt bei abhängigen Zufallszahlen auf. Bei unabhängigen Zufallszahlen reduziert sich die Formel. Bei abhängigen Zufallszahlen müssen jedoch deren Abhängigkeiten in Form von der Kovarianz beachtet werden, um das Ergebnis der Summe der Varianzen nicht zu verfälschen. (vgl. Kreyszig (1999, S. 1098 f.))

$$\sigma_Z^2 = \sigma_X^2 + \sigma_Y^2 \quad (2.16)$$

Varianz-Kovarianz-Matrix

In der Varianz-Kovarianz-Matrix, oder kurz Kovarianzmatrix, **MCov** können in einem mehrdimensionalen Fall von Zufallszahlen die Varianzen und Kovarianzen in einer Übersicht dargestellt werden.

$$\mathbf{MCov}(Dim) = \begin{pmatrix} \sigma_{X_1}^2 & \sigma_{X_1X_2} & \cdots & \sigma_{X_1X_n} \\ \sigma_{X_2X_1} & \sigma_{X_2}^2 & \cdots & \sigma_{X_2X_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{X_nX_1} & \sigma_{X_nX_2} & \cdots & \sigma_{X_n}^2 \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Die Kovarianzmatrix ist eine $n \times n$ -Matrix und positiv semidefinit beziehungsweise positiv definit (vgl. Hull (2012, S. 639 f.) und Hartung & Elpelt (2007, S. 66)). Diese Information ist in weiterer Folge hilfreich, wenn ermittelte Kovarianzen überprüft werden sollen, ob sie den mathematischen Ansprüchen genügen. Eine Möglichkeit hierfür besteht in der Ermittlung der Eigenwerte von der Matrix. Sind alle Eigenwerte gleich 0 oder größer 0, dann handelt es sich um eine positiv semidefinite oder positiv definite Matrix (vgl. Higham (2002, S. 329 f.)).

Korrelationskoeffizient

Bei der Addition mehrerer Varianzen Var von abhängigen Zufallszahlen stellen die Kovarianzen Cov Unbekannte dar. Können die Abhängigkeiten und Zusammenhänge in Form von linearen Korrelationen dargestellt werden, besteht die Möglichkeit, die Kovarianz über die Definition der Korrelation ρ abzubilden. Die Korrelation wird dabei immer für ein Zufallszahlenpaar ermittelt. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 144))

$$\rho = \rho_{X_1 X_2} = \frac{Cov(X_1 X_2)}{\sqrt{Var(X_1)Var(X_2)}} \quad (2.18)$$

Nach Umformung ergibt sich für die Kovarianz:

$$Cov(X_1 X_2) = \rho_{X_1 X_2} \sqrt{Var(X_1)Var(X_2)} \quad (2.19)$$

Im Fall der Addition von zwei Zufallszahlen ist die einzige Unbekannte die Korrelation ρ , da sowohl der Mittelwert μ als auch die Varianz σ^2 auf Basis der Stichproben approximativ ermittelt werden können. Für die Korrelation auf Basis von Stichproben werden zwei häufig verwendete Methoden vorgestellt.

Pearsonscher Korrelationskoeffizient

Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient r zweier Zufallszahlen wird auf Basis von Stichprobenwerten mit folgender Formel approximativ ermittelt (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 145)):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.20)$$

Für den Korrelationskoeffizienten ρ der Grundgesamtheit, der mit dem Korrelationskoeffizienten der Stichprobe r approximiert wird, gilt:

$$-1 \leq \rho \leq 1 \quad (2.21)$$

Jedoch ist zu beachten, dass „[...] der Korrelationskoeffizient [...] kein Maß für die Abhängigkeit schlechthin, wohl aber für lineare Abhängigkeit, [...]“ (Kreyszig (1979, S. 308)) darstellt. Über den Einsatz des vorgestellten Korrelationskoeffizienten im aktuellen Stand der Technik wird in Kapitel 2.7.2 ein Überblick gegeben.

Im multivariaten Fall können die Korrelationskoeffizienten des Zufallsvektors \mathbf{X} in einer Korrelationsmatrix übersichtlich zusammengefasst werden. Die Korrelationsmatrix **Corr** besitzt wie die Kovarianzmatrix die Eigenschaft, dass sie positiv definit beziehungsweise positiv semidefinit ist (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 66)).

$$\mathbf{Corr}(Dim) = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{X_1 X_2} & \cdots & \rho_{X_1 X_n} \\ \rho_{X_2 X_1} & 1 & \cdots & \rho_{X_2 X_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \\ \rho_{X_n X_1} & \rho_{X_n X_2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Spearmanischer Korrelationskoeffizient

Der Spearmanische Korrelationskoeffizient beziehungsweise Rang-Korrelationskoeffizient stellt ein nicht-parametrisches Maß für statistische Abhängigkeit zwischen zwei Zufallsvariablen dar (vgl. Kurowicka & Cooke (2006, S. 30 ff.) und Bakhshi & Touran (2012, S. 134)). Dieser Koeffizient wird bei Zufallszahlen eingesetzt, zu deren Beschreibung keine Normalverteilung angewendet werden kann. Mit Stichprobenergebnissen kann der Spearmanische Korrelationskoeffizient r^s mit folgender Formel ermittelt werden (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 190 f.)):

$$r^s = \frac{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \overline{R(x)})(R(y_i) - \overline{R(y)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R(x_i) - \overline{R(x)})^2 \sum_{i=1}^n (R(y_i) - \overline{R(y)})^2}} \quad (2.23)$$

Für dieses Verfahren werden nur Ranginformationen zur Schätzung von ρ verwendet. Eine Rangzahl entspricht dabei einer positiven, ganzen Zahl. Jedem Stichprobenwert wird dabei ein Rang zugewiesen, wobei beim kleinsten begonnen wird und dieser den Rang 1 bekommt. Die restlichen Ränge werden entsprechend der Größenreihenfolge der Stichprobenwerte vergeben. Sind Stichprobenwerte gleich, wird allen Werten das arithmetische Mittel der in Frage kommenden Ränge zugewiesen. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 191 f.))

Wie beim Pearsonschen Korrelationskoeffizienten gilt folgendes Werteintervall für den Spearmanischen Korrelationskoeffizienten:

$$-1 \leq \rho \leq 1 \quad (2.24)$$

2.6.4 Konfidenzintervall

Deutsch (2008, S. 362) definiert ein Konfidenzintervall folgendermaßen: „Ganz allgemein ist das so genannte Konfidenzintervall einer beliebigen stochastischen Variablen X mit der Wahrscheinlichkeitsverteilungsdichte $F(X)$ als der Wertebereich (das Intervall) definiert, der von der stochastischen Variablen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit P nicht verlassen wird.“ Die Wahrscheinlichkeit P wird als Konfidenz oder Konfidenzniveau bezeichnet und im Allgemeinen vorgegeben. Wird beispielsweise ein Konfidenzniveau mit 95 Prozent angegeben, dann liegt der Wert der Zufallszahl mit fünf Prozent Wahrscheinlichkeit außerhalb des Konfidenzintervalls, das für das Konfidenzniveau von 95 Prozent angegeben wird. Mit 95-prozentiger Sicherheit liegt die Zufallszahl also innerhalb des Konfidenzintervalls (vgl. Deutsch (2008, S. 362)).

Nachdem in der Statistik oft von einer Stichprobe auf die Grundgesamtheit geschlossen wird, stellt sich die Frage, welche Genauigkeit diese Approximation besitzt. Konfidenzintervalle geben für bestimmte Größen einen Bereich an, der den Wert der Grundgesamtheit mit einer großen, beliebig gewählten Wahrscheinlichkeit einschließt. Vielfach wird hierfür die Konfidenzzahl als eine 95- oder 99-prozentige Wahrscheinlichkeit ausgewählt. (vgl. Kreyszig (1979, S. 183))

Bei einer statistischen Signifikanz wird hingegen überprüft, ob ein spezifisch ermittelter Parameter mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit größer oder kleiner als ein bestimmter Wert ist. Bei der definierten Wahrscheinlichkeit α , mit der der Wert außerhalb der Grenzen liegt, spricht man vom Signifikanzniveau. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 46 f.))

Die Grenzen der Signifikanz und des Konfidenzintervalls beschreiben den gleichen Bereich, wenn das Signifikanzniveau und die Konfidenzzahl gleich angenommen wird. Bei der Konfidenz wird der Bereich ermittelt, der den Wert der Grundgesamtheit mit der Konfidenzzahl beinhaltet, während bei der Signifikanz die Analyse im Vordergrund steht, ob der Wert der Grundgesamtheit den Bereich, der durch das Signifikanzniveau definiert wird, mit einer höheren Wahrscheinlichkeit als das Signifikanzniveau verlässt.

Konfidenzintervall bei Normalverteilungen

Konfidenzintervalle bei Normalverteilungen können sowohl für den Mittelwert als auch die Standardabweichung ermittelt werden. Für die Herleitung und näheren Erklärungen sei an dieser Stelle auf Kreyszig (1979, S. 183 ff.) und Hartung & Elpelt (2007, S. 38 ff.) verwiesen. Bei zweidimensionalen Normalverteilungen kann für die Schätzung des Korrelationskoeffizienten ρ der Grundgesamtheit auf Basis des Koeffizienten r der Stichprobe ebenfalls ein Konfidenzintervall angegeben werden. Das Vorgehen wird bei Kreyszig (1979, S. 316 ff.) und Hartung & Elpelt (2007, S. 162 ff.) detailliert beschrieben.

Tests bei Normalverteilungen

Aufgrund von Stichproben wird nicht nur auf die Parameter der Verteilung der Grundgesamtheit geschlossen, sondern zu Beginn auf die Art der Verteilung an sich. Die Art der Verteilung wird vielfach im ersten Schritt aufgrund von Vermutungen oder von Interpretationen grafischer Auswertungen ausgewählt. Diese Vermutungen entsprechen einer Hypothese, für die verschiedene Tests in der Statistik vorhanden sind, um ihre Güte zu testen. Nachdem die Stichprobe nur einen Teil der Grundgesamtheit ausmacht, ist davon auszugehen, dass Abweichungen zwischen der Verteilung der Stichprobenwerte und der ausgewählten Verteilungsfunktion auftreten. Tests besitzen die Aufgabe, ein Maß für die

Abweichung zu definieren. Zusätzlich benötigt man für Tests die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Abweichungsmaßes. Als verwendete Beispiele für rechnerisch durchgeführte Tests kann der Chi-Quadrat-Test und der Kolmogoroff-Smirnow-Test erwähnt werden, wobei die Stetigkeit der Verteilung und der Stichprobenumfang die Auswahl des Tests im jeweiligen Anwendungsfall beeinflussen. (vgl. Hartung (2009, S. 182 ff.) und Kreyszig (1979, S. 228 ff.))

Häufig werden in der Praxis sogenannte empirische Quantile-Quantile-Plots (Q-Q-Plots) verwendet, um eine Stichprobe mit quantitativen Merkmalen x_1, \dots, x_n mit einer Verteilungsfunktion zu vergleichen (vgl. Hartung (2009, S. 847) und Hartung & Elpelt (2007, S. 602)). Wird die Stichprobe aufsteigend geordnet, entspricht der i -te Wert x_i dem empirischen $i/(n + 1)$ -Quantil dieser Stichprobe. Man kann im nächsten Schritt diese empirischen Quantile gegen die Quantile der theoretischen Verteilungsfunktion in einem Scatterplot darstellen (vgl. Hartung (2009, S. 847)). Entspricht die Verteilungsfunktion der Verteilung der Stichprobe, dann liegen die Punkte auf einer Geraden durch den Ursprung mit der Steigung 1 (vgl. Hartung (2009, S. 847)).

Bedeutung der graphischen Interpretation für statistische Analysen

Anscombe (1973, S. 17) weist auf die besondere Bedeutung der graphischen Interpretation im Zuge von statistischen Analysen hin, deren Bedeutung immer noch aufrecht ist (vgl. Tufte (2001, S. 14)). Obwohl Berechnungen exakt sind und Graphen nur grob, bieten Graphen dem Anwender, ein grundsätzliches Verständnis für die Daten zu erhalten. Nachdem viele statistische Berechnungen auf Annahmen beruhen, bietet eine graphische Darstellung die Möglichkeit, die Angemessenheit der Annahmen zu überprüfen. Gerade bei der Abhängigkeitsanalyse wird die Darstellung der Daten in einer Punktwolke, eines sogenannten Scatterplots, empfohlen, bevor andere Arten von Datenanalysen und Berechnungen erfolgen. Es werden fünf grundlegende Fälle von möglichen Abhängigkeitsformen unterschieden, die in Abbildung 2.28 dargestellt werden. (vgl. Anscombe (1973))

In der Arbeit werden Regressionsanalysen mit der Methode der kleinsten Quadrate in Beziehung zu diesen Abhängigkeitsformen näher betrachtet. Nachdem diese Regressionsgeraden ebenso wie Korrelationen lineare Abhängigkeiten abbilden, kann die Unterteilung ebenso für Korrelationen verwendet werden und auf die beispielhafte Darstellung 2.29 hingewiesen werden. Hierbei werden vier Datensätze mit Scatterplots dargestellt, die nach der Berechnung von Anscombe (1973) dieselbe Korrelationsgerade besitzen, jedoch ein gänzlich unterschiedliches Bild in der Darstellung. (vgl. Anscombe (1973, S. 19 f.))

Eine Berechnung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ergibt ebenso für alle vier Fälle denselben Wert von rund 0,82.

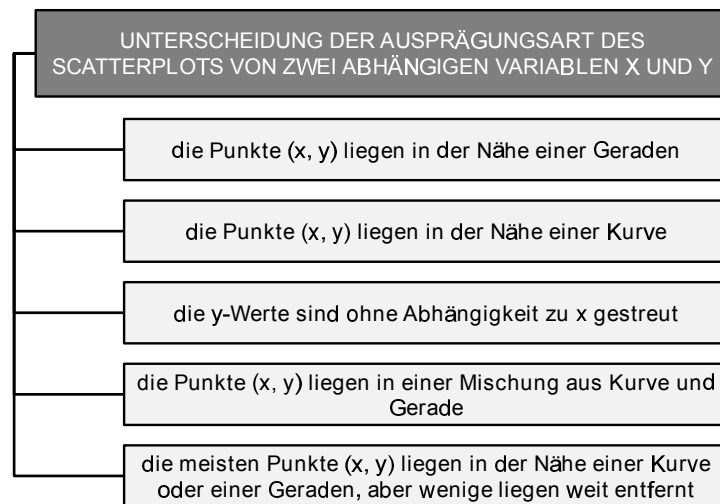


Abb. 2.28: Unterscheidung der Ausprägungsart des Scatterplots von zwei abhängigen Variablen x und y (eigene Darstellung nach Anscombe (1973, S. 17))

Scatterplot I zeigt dabei einen Fall, der typischerweise eine Regressionsgerade rechtfertigt. Scatterplot II hingegen zeigt deutlich den kurvenartigen Verlauf, der ohne graphische Darstellung ignoriert worden wäre. Scatterplot III und IV zeigen deutlich den Einfluss von Ausreißern, die aus der Berechnung der Regressionsgeraden nicht ausgeschlossen wurden. An dieser Stelle wäre eine Interpretation der möglichen Ausschlussgründe notwendig.

2.6.5 Schnittstelle der statistischen Methoden mit der frühen Fabrikplanung, Angebotslegung und Risikomanagement

Die mathematische Statistik bietet vielfältige Anwendungsmethoden und -werkzeuge, die in der Wissenschaft häufig Verwendung finden. Durch die Auswahl der Stochastik als Vorkalkulationsmethode zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung in Kapitel 2.4.3 kommt diesen Methoden in dieser Arbeit hohe Bedeutung zu.

In Kapitel 2.4.3 wird die Anforderung definiert, dass die Unsicherheiten der einzelnen Dimensionierungsgrößen quantifiziert werden. Dadurch fällt die Auswahl von statistischen Werkzeugen zur Quantifizierung von Unsicherheiten in das Gebiet der Multivariaten Statistik. Werden Risiken zu einem Gesamtrisiko aggregiert, muss analysiert werden, ob Abhängigkeiten zwischen den Risiken bestehen und wie diese Abhängigkeiten abgebildet werden können. Mit dem Pearsonschen und den Spearmanschen Korrelationskoeffizienten stehen zwei etablierte Werkzeuge für eine Korrelationsanalyse zur Verfügung (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 190 f.) und Kreyszig (1979, S. 308)). Jedoch darf eine graphische Plausibilitätsüberprüfung in Form eines Scatterplots der untersuchten Variablen am

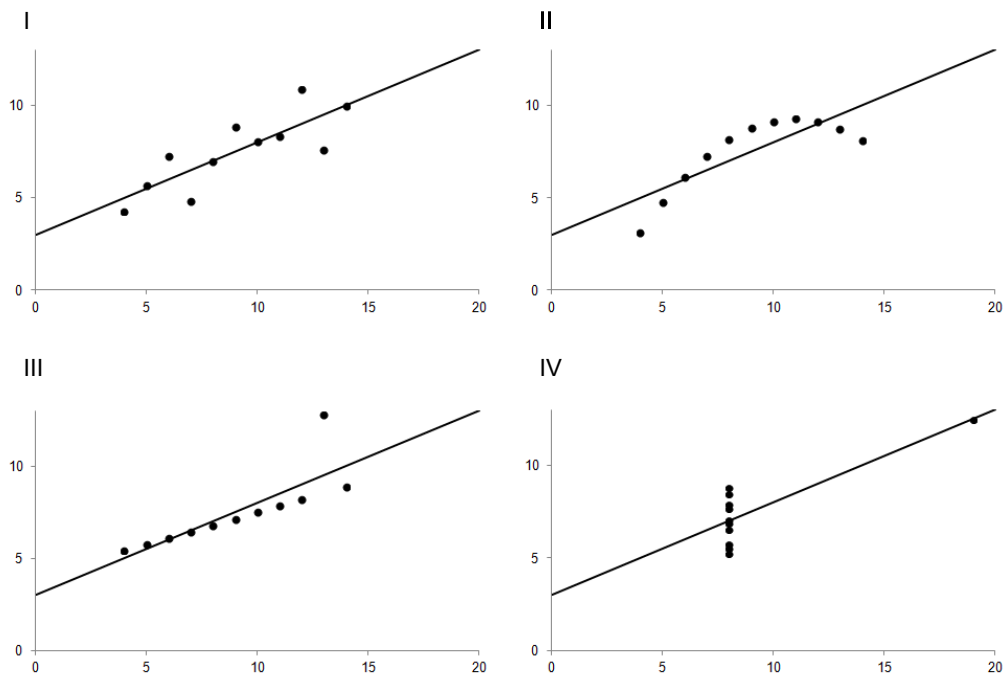


Abb. 2.29: Beispiele für Regressionsanalysen mit demselben Ergebnis für die Regressionsgerade (Anscombe (1973, S. 19))

Anfang der Analyse nicht fehlen (vgl. Anscombe (1973, S. 17)).

Tests, Signifikanz und Konfidenzintervall helfen in der Anwendung, um die Grenzen der statistischen Aussagekraft zu definieren und die getroffenen Annahmen zu überprüfen. Im nächsten Schritt besteht die Notwendigkeit, den aktuellen Stand der Technik bezüglich der Anwendung der Stochastik, die sich mit Zufallsexperimenten und Wahrscheinlichkeiten beschäftigt, in der frühen Fabrikplanung beziehungsweise in frühen Planungsphasen anderer Fachgebiete zu erheben. Es muss jedoch davon ausgegangen werden, dass aufgrund des theoretisch unendlichen Lösungsraums bei Planungen die Grundgesamtheit der Daten bei der Fabrikplanung nicht vorhanden ist und dem Planungsexperten nur Stichprobenwerte zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund befindet sich die vorgestellte Methodik im Bereich der induktiven Statistik.

Zusammenfassung der für diese Arbeit bedeutenden Literatur der statistischen Methoden

Für die statistischen Methoden kann auf die Grundlagenliteratur von Hartung (vgl. Hartung (2009) und Hartung & Elpelt (2007)) sowie Kreyszig (vgl. Kreyszig (1999) und Kreyszig (1979)) zurückgegriffen werden, die das mathematische Grundgerüst für die in dieser Arbeit entwickelten Modelle auf Basis der multivariaten Statistik liefern. Der Stand der Technik unter Berücksichtigung von verschiedenen Umsetzungsbeispielen wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

2.7 Quantifizierungsmöglichkeiten von Unsicherheiten

In der Literatur finden sich verschiedene Ansätze zur Quantifizierung von Unsicherheiten in diversen Anwendungen und Branchen. Quantifizierung bedeutet hierbei die mengenmäßige Beschreibung, welche die Unsicherheiten messbar macht. Wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben wird, ist nach Knight (1921, S. 9) die Quantifizierung von Unsicherheiten die Grundvoraussetzung, um diese in eine Risikobetrachtung überführen zu können. Grundsätzlich können die Methoden in deterministische und stochastische unterschieden werden, wobei in dieser Arbeit, wie in Kapitel 2.4.3 im Zuge der Bewertung von Kalkulationsmethoden definiert wird, die stochastischen Methoden im Vordergrund stehen.

In der Finanzwirtschaft finden die Ansätze zur Quantifizierung ihren Ausgang bei Markowitz (1959), der im Zuge der Portfolio-Theorie eine Methode entwickelte, um das Gesamtrisiko eines Portfolios von Finanzinstrumenten zu bewerten und in weiterer Folge Portfoliozusammensetzungen im Hinblick auf die Risikobereitschaft des Portfoliobesitzers geeignet auszuwählen. Das Gesamtrisiko von Portfolios betreffend betont Markowitz die Notwendigkeit einer Berücksichtigung von Korrelationen der Risiken der Finanzinstrumente untereinander. Als Basis für die Berechnung dient hierbei der Datensatz historischer Werte, die der Zukunftsprognose dienen. Bewegten sich die Werte der Finanzinstrumente in der Vergangenheit in die gleiche Richtung, spricht man von positiver Korrelation und bewegten sie sich in entgegengesetzte Richtung, dann wird dies mit negativer Korrelation bezeichnet. Korrelationen, die von einer vollkommen positiven Korrelation abweichen, führen zu einer Verringerung der Gesamtrisiken, zu sogenannten Diversifikationseffekten. (vgl. Markowitz (1959, S. 5))

Die Methodik zur Berechnung von Risiken bei Portfolios nach Markowitz findet umfangreiche Anwendung in der Praxis und Eingang in zahlreiche Literatur (vgl. unter anderen Hull (2012), Deutsch (2008), Berk & DeMarzo (2007), Cech (2006) und Koonce et al. (2006)). Die Korrelationen mit nur einem Faktor je Wertepaar stellen jedoch eine Vereinfachung dar, die in jüngster Zeit zu neuen Studien führte. Diese Studien beschäftigten sich vor allem mit spezifischen Abhängigkeiten in den Randbereichen, die Extremsituationen wie beispielsweise Großschäden bei Versicherungsrisiken beschreiben. Sogenannte Copulafunktionen bieten hierfür Möglichkeiten, Korrelationen in Abhängigkeit von Bereichen zu beschreiben, um diesen Anforderungen zu entsprechen (vgl. Niehof (2009), Cech (2006), Glauser (2003) und Kurowicka & Cooke (2001)).

Unsicherheiten spielen im Projektmanagement ebenfalls eine wichtige Rolle, für die Touran & Wisner (1992) eine Methode zur Quantifizierung von Unsicherheiten der Projektkosten entwickelten. Um auch unsymmetrische Kosten abbilden und aggregieren zu können, verwendet dieser Ansatz Lognormalverteilungen, die in Normalverteilungen transferiert werden können und dann die Korrelationen in Form von Kovarianzen berücksichtigen (vgl. Touran & Wisner (1992, S. 262)). Im Zuge einer Monte-Carlo-Simulation (MCS) zur

Aggregation der einzelnen Kosten werden die Korrelationen mit einem zusätzlich ermittelten Kostenfaktor miteinbezogen (vgl. Touran & Wiser (1992, S. 263)). Korrelationen werden grundsätzlich über die zwei Wege der historischen Daten oder Expertenschätzungen ermittelt (vgl. Touran (1993, S. 60 und 64)). Spätere Versuche, verschiedene Verteilungen inklusive deren Korrelationen zu aggregieren, greifen auf die sogenannten Iman-Conover Methode zurück, wobei die Korrelationsmatrix mit der Cholesky-Zerlegung aufgelöst wird und Korrelationen als Zusatzterme der einzelnen Verteilungen im Zuge einer MCS mit kalkuliert werden (vgl. Yang (2008, S. 352) und Iman & Conover (1982)). Nachdem die Anwendung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten auf Normalverteilungen beschränkt ist, bietet der Spearmansche Korrelationskoeffizient in diesen Anwendungen mehr Potential (vgl. Touran & Suphot (1997, S. 297 f.)). Die Aggregation der Risiken mittels der MCS und des Spearmanschen Korrelationskoeffizienten befindet sich in einem etablierten Status im Projektmanagement und spiegelt sich auch in dessen Literatur wider (vgl. Cooper et al. (2005) und Chapman & Ward (2003)). Spezifische Fachliteratur, beispielsweise der Luftfahrt, nimmt in jüngster Zeit dieses Thema auch auf (vgl. Gudmundsson (2014)).

In der Bauwirtschaft wird die optimale Verteilung für deren spezielle Anwendungsfälle untersucht (vgl. Yang (2011), Chou et al. (2009), Yang (2008) und Yang (2004)). Die Untersuchungen zeigen vorteilhaftes Einsetzen von Lognormalverteilungen als auch Betanormalverteilungen. Wall (1997) zeigte in seiner Arbeit die besondere Bedeutung der Berücksichtigung von Korrelationen, die über die Auswahl der richtigen Verteilung hinausgeht. Eine Vernachlässigung der Korrelation führt aufgrund seiner Untersuchungen zu fehlerhaften Risikoanalysen und irreführenden Ergebnissen (Wall (1997, S. 250)). Daraus ist folgende für die vorliegende Arbeit wichtige Feststellung zu entnehmen: Die Berücksichtigung der Korrelation bei Risikoaggregationen ist wichtiger als die Auswahl einer geeigneten Verteilung (vgl. Wall (1997, S. 254)). Dennoch werden weiterhin für spezifische Anwendungen am besten geeignete Verteilungen ermittelt, wobei auch diese, ausgehend von der Dreiecksverteilung, Potential bei bestimmten Anwendungsfällen besitzen (vgl. van Drop & Kotz (2002)). Ebenso wird auch nach gemeinsamen Lösungen zur Unsicherheitsquantifizierung für verschiedenartige Parameter wie zum Beispiel Zeit und Kosten gesucht (vgl. Yang (2011)). Trotz diverser Bemühungen und Forschungen wird jedoch festgestellt, dass weiterhin diese entwickelten stochastischen Simulationsmethoden in der Wirtschaft relativ wenig eingesetzt werden (vgl. Chou (2011, S. 706)). Mit dem Versuch eines vereinfachten Entscheidungstools soll die Anwendbarkeit verbessert werden (vgl. Chou (2011, S. 706)).

Wall (1997, S. 255) zeigte in seiner Arbeit auf, dass nur wenige Veröffentlichungen existieren, die sich mit der Abhängigkeit von Kosten beschäftigen, um in weiterer Folge den Korrelationsfaktor zu ermitteln. Die Grundlagen dafür schuf Touran (1993) mit Methoden, basierend auf historischen Daten oder Expertenschätzungen, die aber beide Schwächen aufweisen. Historische Daten basieren auf vergangenen Projekten. Jedoch können sich

die Rahmenbedingungen für zukünftige Projekte aufgrund beispielsweise neuer Herstellungsprozesse so verändern, dass die Korrelationen der Vergangenheit nicht mehr zutreffen. Zusätzlich sind in Unternehmen oft keine Daten in einer Qualität vorhanden, die statistische Aussagen wie Korrelationen zulassen (vgl. Gleißner (2014, S. 69)). Bei komplexen Produkten ist es hingegen fraglich, ob die Planungsexperten Schätzungen über die Korrelationen der Kosten abgeben können, da diese implizit Auswirkungen auf viele andere Kostenarten haben, die im Team erarbeitet werden und eine einzige Person nicht den Überblick hat. Eine Möglichkeit bietet hier die Analyse der Faktoren, von denen die Kosten gemeinsam abhängig sind. Die Korrelation wird durch diese gemeinsamen Faktoren ausgelöst (vgl. Wang (2002b, S. 379)). Die Anwendung für die faktorenbasierende Korrelation wurde sowohl für Projektkosten als auch für Projektdauer gezeigt (vgl. Wang (2002b) und Wang (2002a)). Ein gemeinsames Modell für Zeit und Kosten in einem Projekt wurde von Yang (2011) unter Verwendung von Beziehungen zwischen Kosten und Kosten, Zeit und Zeit, und Zeit und Kosten vorgestellt.

Im Risikomanagement von Unternehmen wird der Berücksichtigung von Zusammenwirkungen der Risiken eine besondere Bedeutung beigemessen (vgl. Gleißner (2001, S. 125)). Gerade bei der Aggregation der Einzelrisiken zu einem Gesamtrisiko bedarf es einer Berücksichtigung der Korrelationen. Die ökonomische Bedeutung der Risikoaggregation basiert dabei auf der Auswirkung aller Risiken auf den Unternehmenswert beziehungsweise auf der Ertragsabwägung eines Projektes (vgl. Gleißner (2004, S. 350 f.)).

Allen genannten Fachgebieten und Publikationen ist gemein, dass Korrelationen einen äußerst wichtigen Einfluss auf das Gesamtergebnis nehmen, der sogar soweit gehen kann, dass die Abbildung der Korrelationen der einzelnen Faktoren zueinander von höherer Bedeutung ist als die Wahl der richtigen Verteilung (vgl. Wall (1997)). Schwierigkeiten treten jedoch bei der Ermittlung dieser Korrelationen auf, die je Anwendungsfall einer besonderen Betrachtung bedarf. Auch in der Fabrikplanung finden sich vielfältig Hinweise auf Unsicherheiten, die vor allem in der frühen Phase ein hohes Ausmaß annehmen (vgl. Westkämper (2006, S. 12, 105), Bracht et al. (2011), Wiendahl et al. (2009)). Es existieren ebenfalls Ansätze zur Bewertung von Unsicherheiten in der Fabrikplanung sowie in laufenden Produktionen, wobei der Ansatz der Berechnung mit Korrelationen nach Stand des Autors für dieses Gebiet noch unerschlossen bleibt (vgl. Rimpau (2010), Möller (2007) und Sudhoff (2007)). Vielmehr bietet beispielsweise Rimpau (2010) ein Modell mit Wahlmöglichkeit der richtigen Verteilungen zur Beschreibung der Unsicherheiten, wobei die Korrelationen und Abhängigkeiten gänzlich unberücksichtigt bleiben. Möller (2007) und Sudhoff (2007) konzentrieren sich hingegen auf die Beurteilung der Wandlungsfähigkeit beziehungsweise Mobilität der Produktion, wobei Anforderungen an das Modell gestellt werden, die ein stochastisches Modell nicht erfüllt.

2.7.1 Modellierung von Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die Quantifizierung der Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen stellt eine State-of-the-Art Anwendung dar, die durch zahlreiche Veröffentlichungen in verschiedenen Branchen vor allem bei Kostenkalkulationen dokumentiert ist (vgl. beispielsweise Gudmundsson (2014), Yang (2011), Deutsch (2008) Cooper et al. (2005), Gleißner (2001), Touran & Wiser (1992) und Markowitz (1959)).

Modellierung von Unsicherheiten mit verschiedenen Verteilungen

In der Literatur der Statistik existiert eine Vielzahl von möglichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, wobei an dieser Stelle diejenigen betrachtet werden, die in der Literatur der Unsicherheitsquantifizierung entsprechende Verbreitung finden (vgl. beispielsweise Hartung (2009), Pruscha (2006) und Kreyszig (1979)).

Für die zu ermittelnden Kosten werden Kostenbereiche definiert, in denen diese liegen können. Um zu definieren, welche Kosten am wahrscheinlichsten sind, werden dazu spezielle Verteilungen verwendet. Diese Verteilungen können symmetrisch sein, wie dies beispielsweise bei der Normalverteilung oder einer symmetrischen Dreieckverteilung der Fall ist (vgl. beispielsweise Touran (1993) und van Drop & Kotz (2002)). Gerade die Normalverteilung stellt eine besonders wichtige Wahrscheinlichkeitsverteilung dar (vgl. Kreyszig (1999, S. 1085)). In der Finanzmathematik stehen für Finanzinstrumente oftmals umfangreiche Daten aus der Vergangenheit zur Verfügung, die ein normalverteiltes Verhalten zeigen (vgl. Markowitz (1959)). Als Maß für die Volatilität der Finanzinstrumente gilt dabei die Standardabweichung.

Tendiert die Wahrscheinlichkeit zu einer Grenze des Bereiches, kann eine schiefe Verteilung verwendet werden, die diese Asymmetrie beschreibt. Hierfür können beispielsweise die Betaverteilung oder Lognormalverteilung ihre Anwendung finden (vgl. beispielsweise Yang (2004), Wall (1997) und Touran & Wiser (1992)). Die Betaverteilung findet auch Einsatz bei der netzwerkbasierten Terminisierungsmethode Program Evaluation and Review Technique (PERT) (vgl. van Drop & Kotz (2002, S. 65 f.), Riley (1995, S. 282) und Touran & Wiser (1992, S. 260)). Die Lognormalverteilung bietet hingegen eine Möglichkeit zur Beschreibung von rechtsschiefen Verteilungen (vgl. Hartung (2009, S. 151)). Hierbei werden die Werte logarithmiert und dann analysiert, ob die Verteilung der logarithmierten Werte symmetrisch ist und einer Normalverteilung folgt (vgl. Hartung (2009, S. 151)). In weiterer Folge bietet diese Transformierbarkeit eine Vereinfachung bei der Aggregation zum Gesamtrisiko (vgl. Touran & Wiser (1992, S. 262)). Dreiecksverteilungen werden durch den Minimal- und Maximalwert sowie wahrscheinlichsten Wert eindeutig bestimmt und bieten aufgrund der intuitiven Handhabbarkeit mit klar definierten Grenzen Potential für Anwendungen in der Praxis (vgl. van Drop & Kotz (2002, S. 65 f.)).

Fehlen Informationen über den wahrscheinlichsten Fall, aber können Maximal- und Minimalgrenzen gesetzt werden, stellt die Gleichverteilung eine geeignete Wahl dar (vgl. Touran & Wiser (1992, S. 259)). Somit bietet die Gleichverteilung einen generellen Ansatz für Anwendungsfälle mit geringer Qualität der Information über die Unsicherheiten. Gerade bei der Einführung einer Methodik zur Quantifizierung von Unsicherheiten können Daten aus der Vergangenheit fehlen, die für die Methodik spezifisch anwendbar wären.

Abschließend wird noch einmal auf die Arbeit von Wall (1997) verwiesen, in der der Berücksichtigung von Korrelationen eine höhere Bedeutung beigemessen wird als der richtigen Wahl der Verteilungen, wobei er in seiner Forschung die Beta-Verteilung und Lognormalverteilung berücksichtigt.

2.7.2 Modellierung der Abhängigkeiten der Unsicherheitsfaktoren

Es existieren verschiedene Verfahren zur Modellierung von Abhängigkeiten, wobei in der Theorie sowie Praxis verschiedene Verfahren im Bezug auf die Aggregation von Risiken etabliert sind. Darunter zählen vor allem der Pearsonsche und der Spearman'sche Korrelationskoeffizient, die bei verschiedenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen Anwendung finden. Die statistischen Grundlagen dazu werden in Kapitel 2.6.3 beschrieben. Die Korrelationen stellen dabei ein lineares Maß für den Zusammenhang zweier Parameter dar (vgl. Niehof (2009, S. 33)). Die Korrelationsmaße fassen hierbei die gesamte Abhängigkeitsstruktur in einer einzelnen Zahl im Intervall von Minus 1 bis Plus 1 zusammen (vgl. Niehof (2009, S. 33)). Bei positivem Vorzeichen spricht man von einem „positiv korrelierten“ Verhalten, wobei sich die zwei analysierten Parameter tendenziell in die gleiche Richtung bewegen (vgl. Niehof (2009, S. 24)). Ist die Tendenz stärker, wird auch der Korrelationskoeffizient höher, bis er mit 1 sein Maximum erhält, was ein „vollkommen korreliertes“ Verhalten bedeutet. Bei gegenläufigem Verhalten wird hingegen der Ausdruck „negativ korreliert“ verwendet (vgl. Niehof (2009, S. 24)).

Korrelation und Kausalität

Einen speziellen Fall der Korrelation stellt die sogenannte Scheinkorrelation dar (vgl. Hartung (2009, S. 77 und 545) und Simon (1954, S. 467 f.)). Diese Korrelation beschreibt eine Abhängigkeit zweier Parameter, wobei es keinen kausalen Zusammenhang zwischen beiden gibt. Vielmehr entsteht die Korrelation durch eine gemeinsame Abhängigkeit beider Korrelationen von einem dritten Parameter. Betrachtet man als Beispiel die Abhängigkeit der zwei Parameter A und B, ist ersichtlich, dass beide in einem bestimmten Maß direkt von Parameter C abhängen. Infolgedessen erzielt der Korrelationskoeffizient ein Ergebnis ungleich 0. Diese Korrelation hat jedoch ihren Ursprung nicht aufgrund

einer kausalen Beziehung zwischen A und B, sondern aufgrund der kausalen Beziehung beider zu C. Dennoch besitzen A und B eine Korrelation an sich. Wang (2002b) entwickelte ein Kostenmodell mit Korrelation zwischen den Einzelkosten. Hierbei stellt er die gemeinsamen Faktoren der Einzelkosten ins Zentrum und ermittelte dadurch den Korrelationskoeffizienten (vgl. Wang (2002b, S. 372 f.)). An sich ermittelt er somit Scheinkorrelationen. Jedoch stellte er nicht eine Untersuchung nach kausalen Zusammenhängen in den Mittelpunkt, sondern lediglich eine Quantifizierung der Korrelationen, die genau auf der gemeinsamen Abhängigkeit basiert. Durch die Aussage „Korrelation ist kein Beweis für Kausalität“ (Simon (1954, S. 467)) lässt sich der Umkehrschluss treffen, dass auch dann Korrelationen bestehen können, wenn keine Kausalität nachweisbar ist. Und genau dies steht im Fokus der Untersuchungen von Wang (2002b).

Cooper et al. (2005, S. 272 f.) fassen Korrelationen in vier Kategorien zusammen, wie in Abbildung 2.30 dargestellt wird. Die erste Kategorie beschreibt Korrelationen, die aufgrund von gemeinsamen Ursachen der betrachteten Parameter entstehen. In der zweiten werden kausale Beziehungen zwischen den Parametern direkt zusammengefasst. Zusätzlich können Korrelationen entstehen, wenn die Konsequenz eines Ereignisses aufgrund der Zusammenwirkung beider Risiken eine nichtlineare Auswirkung besitzt. In die letzte Kategorie werden Korrelationen eingeordnet, die wenig zu verstehen oder schlecht definiert sind. (vgl. Cooper et al. (2005, S. 272 f.))

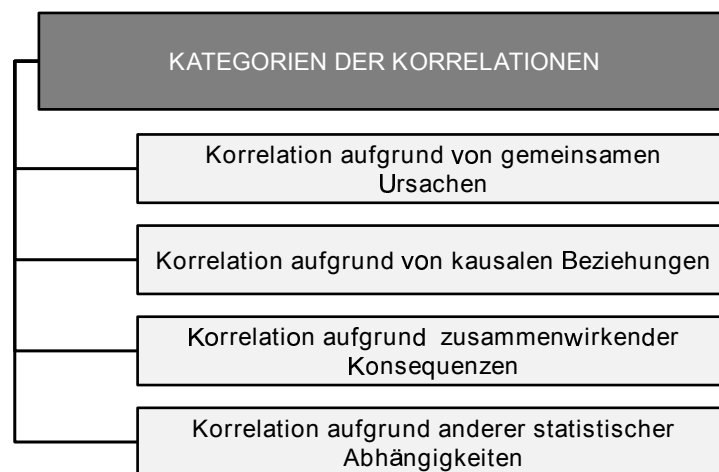


Abb. 2.30: Kategorisierung der Korrelationen (eigene Darstellung in Anlehnung an Cooper et al. (2005, S. 272 f.))

Korrelationskoeffizienten

Korrelationskoeffizienten besitzen den Vorteil, dass sie bei einer genügend vorhandenen Anzahl von Beispieldaten einfach kalkulierbar und im Zuge einer Weiterverwendung bei der Risikoaggregation geeignete Methoden vorhanden sind, um diese zu verwenden. Sie besitzen jedoch Limitierungen aufgrund der Zusammenfassung der Abhängigkeiten zu

einem Einzelwert. Nichtlineare Zusammenhänge bleiben dabei im Allgemeinen unberücksichtigt (vgl. Niehof (2009, S. 37)). Bei Anwendungen, wie Verteilungen mit dicken Tails, also mit außergewöhnlich hohen Verteilungen an Rand- und Extrembereichen, können die Korrelationskoeffizienten dies nur ungenügend berücksichtigen (vgl. Niehof (2009, S. 37) und Cech (2006, S. 11)). Bei bivariaten Verteilungen befinden sich die Tails im oberen rechten und unteren linken Quadranten des Scatterplots (vgl. Niehof (2009, S. 47)).

Der Personische Korrelationskoeffizient ist dabei ein lineares Maß für die Abhängigkeit der Werte des betrachteten Parameterpaares, während der Spearmanische Korrelationskoeffizient ein Maß für die Abhängigkeit der Ränge der Werte des Parameterpaares (vgl. Bakhshi & Touran (2012, S. 134)) darstellt. Der Spearmanische Koeffizient misst die Monotonie und der Personische Koeffizient die lineare Beziehung (vgl. Touran & Suphot (1997, S. 297)). Im Fall korrelierender Normalverteilungen besteht dabei ein definierter Zusammenhang zwischen den beiden Korrelationskoeffizienten (vgl. Kurowicka & Cooke (2001, S. 1797)). Werden jedoch Verteilungen betrachtet, die nicht normalverteilt sind, dann existiert immer das Spearmanische Korrelationsmaß (vgl. Kurowicka & Cooke (2001, S. 1796)). Diese Korrelation kann jedoch nicht unter allen Bedingungen in ein Pearsonsches Korrelationsmaß transferiert werden (vgl. Kurowicka & Cooke (2001, S. 1797)). Somit kann der Spearmanische Korrelationskoeffizient verteilungsunabhängig verwendet werden und der Personische Korrelationskoeffizient findet seine Anwendung bei multivariaten Normalverteilungen (vgl. Bakhshi & Touran (2012, S. 134), Touran & Suphot (1997, S. 297) und Iman & Conover (1982, S. 313)).

Ergänzung eines generischen Risikos

Eine andere Methode zur Berücksichtigung der Korrelationseffekte der Risiken besteht in der Definition von generischen Risiken zusätzlich zu den Risiken bei den Einzelkosten (vgl. Elkjaer (2000, S. 141)). Mittels Expertenerfahrung und Brainstorming werden die generischen Risiken identifiziert und bewertet, um in weiterer Folge eine Unterbewertung des Gesamtrisikos aufgrund der Vernachlässigung der Korrelationen sowie versteckten Abhängigkeiten zu verhindern (vgl. Elkjaer (2000, S. 141)). Dieser Ansatz stellt eine weitere Möglichkeit dar, um eine Gesamtrisikobewertung durchzuführen, bietet jedoch wieder Schwächen aufgrund der Quantifizierung der Risiken auf Basis von subjektiven Expertenerfahrungen. Einem Experten fällt es sehr schwer, exakt quantifizierte Risikoangaben zu machen, es führt hierbei eher eine qualifizierte Befragung zu Ergebnissen (vgl. Touran (1993, S. 64)).

Modellierung von Unsicherheiten mit Copulas

Eine Besonderheit stellt die detaillierte Betrachtung von Extremsituationen dar, die mit den sogenannten dicken Tails der Risikoverteilungen eine Beschreibung finden (vgl. Romeike (2004, S. 74 f.)). Die beschriebenen Korrelationskoeffizienten besitzen gerade in diesen Randverteilungen Schwächen, wenn diese ein besonders ausgeprägtes Verhalten besitzen (vgl. Cech (2006, S. 15), Embrechts et al. (2003, S. 329 ff.) und Embrechts et al. (2002, S. 176 ff.)). Zusätzlich lässt eine Unkorreliertheit nicht immer auf Unabhängigkeit schließen (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 38)). Im Finanz- und Versicherungsmarkt ist eine erhöhte gemeinsame Bewegung speziell bei diesen Extremsituationen zu beobachten (vgl. Cech (2006, S. 14) und Embrechts et al. (2002, S. 176)). Der mathematische Ansatz mit Copulas bietet hierbei die Möglichkeit, die Abhängigkeitsstruktur eigens zu modellieren (vgl. Niehof (2009), Cech (2006), Glauser (2003), Embrechts et al. (2002)). Somit liefern die Copulas die vollständige Information bezüglich der Abhängigkeiten, während die Korrelationskoeffizienten eine Vereinfachung darstellen. Um diese Abhängigkeiten beschreiben zu können, sind entweder umfangreiche Daten aus der Vergangenheit oder ein detailliertes Wissen über die Detailabhängigkeiten notwendig. Zusätzlich sind die mathematischen Ansätze der Copulas in bestehenden Softwareangeboten kaum gelöst (vgl. Brechmann & Schepsmeier (2013, S. 2)).

Aggregation von Risiken

Werden alle Kosten zu Gesamtkosten aggregiert, besteht der Bedarf, die mit den Einzelkosten in Verbindung stehenden Risiken, die in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen quantifiziert sind, ebenfalls mit zu aggregieren. Generell steht mit der Monte-Carlo-Simulation eine variabel umsetzbare Methodik zur Verfügung, mit der man nicht korrelierende Verteilungen aggregieren kann (vgl. Rimpau (2010), Koonce et al. (2006) und Gleißner (2001, S. 129)). Sollen jedoch korrelierende Verteilungen aggregiert werden, dann findet die sogenannte Iman-Conover-Methode häufig Anwendung (vgl. Yang (2008) und Iman & Conover (1982)). Diese Methode stellt einen Ansatz zur Einarbeitung von Abhängigkeiten bei der Aggregation von Risiken dar, wobei sie von den Verteilungen unabhängig, für jedes Stichprobensystem anwendbar ist und die Verteilung der Einzelfaktoren intakt bleibt (vgl. Iman & Conover (1982, S. 313 f.)). Die Methode benötigt einerseits die Informationen über die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einzelkosten und andererseits die Korrelationsmatrix der paarweise definierten Spearman'schen Korrelationskoeffizienten der Dimensionierungsgrößen (vgl. Yang (2008, S. 352)). Kurz zusammengefasst, werden korrelierende Werte erzeugt, indem zuvor unkorreliert generierte Werte auf Basis von sogenannten Rängen, die mittels einer Cholesky-Zerlegung abgeleitet werden, neu angeordnet werden (vgl. Yang (2008, S. 352) und Iman & Conover (1982, S. 315 ff.)).

Werden die Unsicherheiten der Einzelkosten nur mit Normalverteilungen beschrieben, handelt es sich um eine multivariate Normalverteilung, die auch ohne einer approximativen Methode gelöst werden kann (vgl. Iman & Conover (1982, S. 326)). Die Gesamtvarianz besteht hierbei aus der Summe der Einzelvarianzen und der Kovarianzen, die den Inhalt einer Kovarianzmatrix ausmachen (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 38)).

Bei Vernachlässigung der Korrelationen kann die Aggregation von Risiken, die mit unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden, über eine MCS erfolgen, die vielfach Anwendung findet (vgl. beispielsweise Rimpau (2010) und Elkjaer (2000)).

2.7.3 Mathematisches Modell nach der Portfolio-Theorie nach Markowitz

Das mathematische Modell nach der Portfolio-Theorie (vgl. Markowitz (1959)) gilt als etabliertes Modell, auf das im Folgenden detailliert eingegangen wird. Dieses Modell bietet die Grundlage für eine Umsetzung einer Risikobetrachtung im Zuge der Fabrikplanung.

Ein Portfolio nach der Portfolio-Theorie besteht aus einer Anzahl von Finanzinstrumenten, wie Aktien und Verbindlichkeiten, mit unterschiedlichem Wert (vgl. Deutsch (2008, S. 385 ff.) und Markowitz (1959, S. 3 ff.)). Die Portfoliogewichtung x_i jedes Finanzinstruments entspricht also dem Anteil jedes Finanzinstruments am Gesamtportfoliowert (vgl. Berk & DeMarzo (2007, S. 324)).

$$x_i = \frac{\text{Wert } W_i \text{ des Finanzinstruments } i}{\text{Gesamtwert } W_P \text{ des Portfolios}} \quad (2.25)$$

Der Wert des Portfolios W_P entspricht der Summe der Werte der einzelnen Finanzinstrumente W_i (vgl. Deutsch (2008, S. 385) und Berk & DeMarzo (2007, S. 324)).

$$W_P = \sum_i x_i W_i \quad (2.26)$$

Jedes dieser Finanzinstrumente ist mit Unsicherheiten bezüglich des zukünftigen Wertes behaftet. Markowitz unterstellt der zukünftigen Entwicklung ein stochastisches Verhalten und schlägt die Modellierung der Unsicherheiten der einzelnen Positionen mit der Normalverteilung vor. Das Maß für die Volatilität, die Standardabweichung σ , wird mit dieser Methodik aus den vergangenen Daten der Finanzinstrumente ermittelt. Die objektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der vergangenen Daten wird dann für zukünftige Prognosen als subjektive Wahrscheinlichkeit beziehungsweise als Vorstellung der zukünftigen Wahrscheinlichkeit verwendet. Neben der Volatilität wird auch das Verhalten des Erwartungswertes, der Mittelwert der Normalverteilung, eruiert. Bei Portfolios von Finanzinstrumenten ist dieser zeitabhängig. Die Beschreibung des erwarteten Ergebnisses von jedem

Finanzinstrument im Portfolio besitzt somit nur zu einem bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft Gültigkeit. (vgl. Markowitz (1959, S. 48))

Für den Besitzer eines Portfolios ist das erwartete Gesamtergebnis zusammen mit der aggregierten Wahrscheinlichkeitsverteilung für einen bestimmten Zeitpunkt in der Zukunft interessant. Die Aggregation der erwarteten Ergebnisse und der Wahrscheinlichkeitsverteilung muss mathematisch unterschieden werden.

Für den Erwartungswert kann eine einfache Aggregationsmethode verwendet werden. Der Erwartungswert der Summe der Finanzinstrumente $E(W_P)$ entspricht der Summe der Erwartungswerte der einzelnen Finanzinstrumente $E(x_i W_i)$. Diese Methode besitzt für alle Fälle von Zufallsvariablen Gültigkeit, wobei es keine Bedeutung hat, ob die Erwartungswerte sich gemeinsam in eine Richtung bewegen oder nicht. (vgl. Markowitz (1959, S. 70) und Berk & DeMarzo (2007, S. 325)).

$$E(W_P) = E\left(\sum_i x_i W_i\right) = \sum_i E(x_i W_i) = \sum_i x_i E(W_i) \quad (2.27)$$

Die Aggregationen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen beinhalten zusätzliche Herausforderungen, die in weiterer Folge von besonderer Bedeutung für die Anwendung der Portfolio-Theorie sind. Die Definition der Varianz Var einer Zufallsvariablen X ist an dieser Stelle hilfreich. Die Varianz ist als das Quadrat der Standardabweichung σ definiert (siehe Kapitel 2.6.2).

$$Var(X) = \sigma^2 \quad (2.28)$$

Zum leichteren Verständnis wird die Aggregation anhand von zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezeigt, in der multivariaten Statistik spricht man von zweidimensionalen oder bivariaten Verteilungen. Erst im Anschluss wird das Ergebnis verallgemeinert. Für die Herleitung der Formeln sei auf die entsprechende Literatur wie Hartung & Elpelt (2007), Deutsch (2008), Berk & DeMarzo (2007) und Markowitz (1959) verwiesen.

$$Var\left(\sum_{i=1}^2 X_i\right) = Var(X_1) + Var(X_2) + 2Cov(X_1 X_2) \quad (2.29)$$

Die Summe der Varianzen von zwei korrelierenden Normalverteilungen entspricht also der Summe aus den Einzelvarianzen und zusätzlich zweimal einer sogenannten Kovarianz Cov . Betrachtet man nun voneinander unabhängige Verteilungen, so reduziert sich die Summe der Varianzen auf die beiden Varianzen der Einzelverteilungen (vgl. Kreyszig (1999, S. 1099)).

$$\text{Var}\left(\sum_{i=1}^2 X_i\right) = \text{Var}(X_1) + \text{Var}(X_2) \quad (2.30)$$

Der Term der Kovarianzen wird folglich bei der Aggregation von unabhängigen Zufallsvariablen 0. Er ist somit ein Term, der die Abhängigkeit der zwei Verteilungen berücksichtigt.

Ein Maß für den linearen Zusammenhang ist mit dem Korrelationskoeffizienten ρ definiert (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 37)).

$$\rho = \rho_{X_1 X_2} = \frac{\text{Cov}(X_1 X_2)}{\sqrt{\text{Var}(X_1)\text{Var}(X_2)}} \quad (2.31)$$

Der Wert ρ entspricht einer normierten Größe und befindet sich immer zwischen Minus 1 und Plus 1 (siehe Abbildung 2.31). Er ist somit ein leicht vergleichbares Maß für die Korrelation. Die Korrelation zwischen zwei Zufallsvariablen ist symmetrisch. Die Korrelation von X_1 und X_2 ergibt dasselbe Ergebnis wie die Korrelation von X_2 und X_1 . Zusätzlich ist die Korrelation einer Zufallsvariablen mit sich selbst 1. (vgl. Deutsch (2008, S. 630))

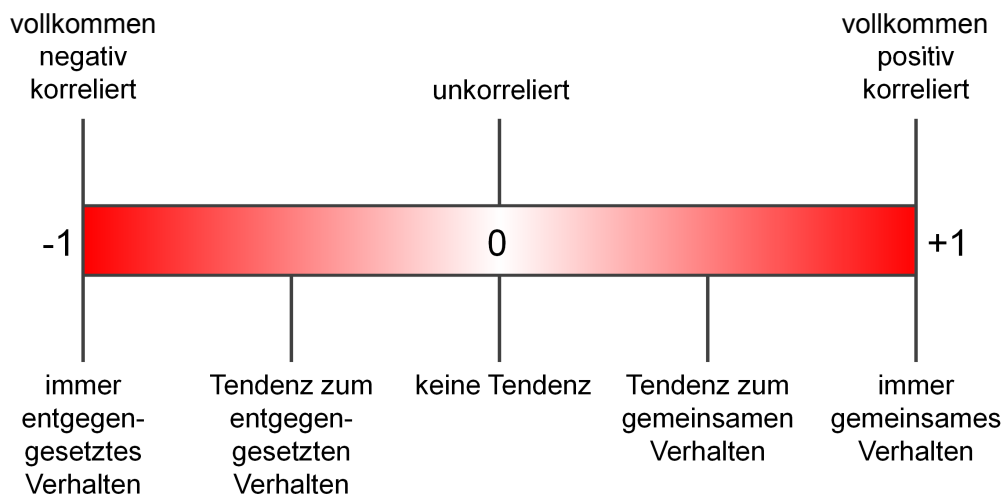


Abb. 2.31: Darstellung des Bereichs des Korrelationskoeffizienten von Minus 1 bis Plus 1 und Definition des Korrelationsverhaltens (eigene Darstellung in Anlehnung an Berk & DeMarzo (2007, S. 327))

Ist der Korrelationskoeffizient 0, so sind auch die Zufallsvariablen X_1 und X_2 unkorreliert. Mit ρ wird jedoch nur der lineare Zusammenhang zwischen zwei Zufallsvariablen gemessen. Sind die Zufallsvariablen unkorreliert, existiert kein linearer Zusammenhang, es besteht jedoch die Möglichkeit einer anderen Art der Abhängigkeit. Bei normalverteilten Zufallsvariablen beinhaltet die Unkorreliertheit aber auch deren stochastische Unabhängigkeit. Ist von Anfang an definiert, dass die Zufallsvariablen unabhängig sind, so sind diese immer unkorreliert. Korreliertheit als lineare Abhängigkeit bedeutet einen Sonderfall von verschiedenen Arten der Abhängigkeit. (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 37 f.))

Für den allgemeinen Fall von mehrdimensionalen, sogenannten multivariaten Verteilungen, ist die Varianz einer Summe von Zufallszahlen die Summe aller Kovarianzen dieser Zufallszahlen. Die Varianzen der einzelnen Zufallszahlen werden dabei mit dem Korrelationskoeffizienten ρ gleich 1 und der Kovarianz gleich der Varianz mit Gleichung 2.31 gebildet. Hierfür kann definiert werden (vgl. Deutsch (2008, S. 631)):

$$\text{Var}\left(\sum_i X_i\right) = \sum_{i,j} \text{Cov}(X_i X_j) = \sum_{i,j} \rho_{X_i X_j} \sqrt{\text{Var}(X_i) \text{Var}(X_j)} \quad (2.32)$$

Im Falle der multivariaten Verteilung bietet sich die Matrizen Schreibweise zum besseren Überblick an. Die Zufallsvariablen aller Verteilungen im mehrdimensionalen Raum werden im Zufallsvektor \mathbf{X} zusammengefasst: (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 64))

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Die Matrix aller Kovarianzen, die $n \times n$ -Kovarianzmatrix \mathbf{MCov} , kann somit folgendermaßen ausgedrückt werden (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 66)):

$$\mathbf{MCov}(X) = \begin{pmatrix} \text{Cov}(X_1 X_1) & \text{Cov}(X_1 X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_1 X_n) \\ \text{Cov}(X_2 X_1) & \text{Cov}(X_2 X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_2 X_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(X_n X_1) & \text{Cov}(X_n X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_n X_n) \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Die Kovarianz $\text{Cov}(X_i X_i)$ entspricht genau der Varianz $\text{Var}(X_i)$ (vgl. Deutsch (2008, S. 631)):

$$\text{Cov}(X_i X_i) = \text{Var}(X_i) \quad (2.35)$$

Daraus folgt, dass der Korrelationskoeffizient $\rho_{X_i X_i}$ bei einer Verteilung mit sich selbst den Wert 1 hat und vollständig positiv korreliert:

$$\rho_{X_i X_i} = 1 \quad (2.36)$$

Mit diesem Wissen kann die Kovarianzmatrix auch geschrieben werden:

$$\mathbf{MCov}(X) = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \text{Cov}(X_1X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_1X_n) \\ \text{Cov}(X_2X_1) & \text{Var}(X_2) & \cdots & \text{Cov}(X_2X_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \text{Cov}(X_nX_1) & \text{Cov}(X_nX_2) & \cdots & \text{Var}(X_n) \end{pmatrix} \quad (2.37)$$

Drückt man alle Kovarianzen in Gleichung 2.34 mittels Gleichung 2.32 und 2.36 durch den Korrelationsfaktor und die Varianzen aus, so erhält man:

$$\mathbf{MCov}(X) = \begin{pmatrix} \text{Var}(X_1) & \cdots & \rho_{X_1X_n} \sqrt{\text{Var}(X_1)\text{Var}(X_n)} \\ \rho_{X_2X_1} \sqrt{\text{Var}(X_2)\text{Var}(X_1)} & \cdots & \rho_{X_2X_n} \sqrt{\text{Var}(X_2)\text{Var}(X_n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{X_nX_1} \sqrt{\text{Var}(X_n)\text{Var}(X_1)} & \cdots & \text{Var}(X_n) \end{pmatrix} \quad (2.38)$$

Mit der Ermittlung aller Varianzen der Einzelwerte sowie der Ermittlung der Korrelationskoeffizienten der Einzelwerte zueinander kann über Gleichung 2.38 die Varianz der Gesamtverteilung ermittelt werden. Die Kovarianz wird folglich als Term der gemeinsamen, linearen Bewegung von den einzelnen Finanzinstrumenten betrachtet.

Ein einfaches Beispiel zum Verständnis ist die Korrelation von Aktien im Bereich Erdöl und von Fluglinien. Der Erfolg von Fluglinien ist maßgeblich abhängig vom Rohstoffpreis des Erdöls, die Kosten von Erdöl besitzen einen sehr großen Anteil an den Gesamtkosten der Fluglinien. Je niedriger der Erdölpreis ist, desto geringer sind die Kosten der Fluglinien und desto größer der Erfolg. Die Aktien von Fluglinien sind also negativ korrelierend, der Korrelationskoeffizient zwischen den Aktienkursen ist abhängig von den betrachteten Kursen und Analyseverfahren und beträgt zwischen 0 und Minus 1. (vgl. Berk & DeMarzo (2007, S. 326 f.))

Die Kovarianzmatrix ist eine symmetrische Matrix, da folgende zwei Gleichungen gelten (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 66)):

$$\rho_{X_iX_j} = \rho_{X_jX_i} \quad (2.39)$$

$$\sqrt{\text{Var}(X_i)\text{Var}(X_j)} = \sqrt{\text{Var}(X_j)\text{Var}(X_i)} \quad (2.40)$$

Die Wurzel aus der Varianz ergibt die Standardabweichung und somit existiert eine vollständige Definition der Gesamtverteilung als Normalverteilung mit dem Erwartungswert

und der Standardabweichung. Dadurch ist die Grundlage für eine mathematische Beschreibung des Risikos bei Portfolios von Finanzinstrumenten gelegt.

Auf Basis der Portfolio-Theorie wurden umfangreiche Modelle entwickelt und verfeinert, welche in der Literatur zahlreich veröffentlicht und diskutiert wurden (vgl. unter anderen Leung (2009), Deutsch (2008), Berk & DeMarzo (2007), Cech (2006) und Gleißner (2004)). Aufgrund wirtschaftlicher Finanzkrisen und Unabwägbarkeiten wird immer wieder die Modellierung mit Normalverteilungen diskutiert. Vor allem wird eine ungenügende Abbildung von Extremsituationen kritisiert und versucht, hierfür spezifische, erweiternde Modelle zu entwickeln (vgl. unter anderen Deutsch (2008) und Cech (2006)). Für die in dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen sind jedoch die Grundlagen der Portfolio-Theorie von entscheidender Bedeutung sowie eine Analyse, in welcher Form diese Theorie in der frühen Fabrikplanung angewendet werden kann, beziehungsweise wo diese an ihre Grenzen stößt.

2.7.4 Interpretation der Anwendung der Quantifizierung von Unsicherheiten bei frühen Fabrikplanungen

Für die Quantifizierung von Unsicherheiten bestehen Methoden nach neuestem Stand der Technik, die in die frühe Phase der Fabrikplanung übertragen werden können. Nach Kapitel 2.4.3 genügt eine stochastische Methode den in dieser Arbeit ermittelten Anforderungen der Fabrikplanung am meisten. Für diese stochastische Methode besteht eine umfassende Forschung in verschiedenen Fachgebieten, wobei die Forschungsergebnisse jedoch nur teilweise in die Methoden der Fabrikplanung einfließen.

Grundsätzlich gliedert sich die Herausforderung zur Quantifizierung von Unsicherheiten mithilfe der Stochastik in zwei Gebiete. Zum einen ist die Art der Verteilung herauszufinden, die die Unsicherheit der einzelnen Fabrikdimensionierungsgrößen am treffendsten beschreibt und zum anderen ist die Aggregation zu betrachten, die durch mögliche Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen zusätzlich beeinflusst wird.

Die Statistik bietet viele verschiedene Verteilungen zur Beschreibung von stochastischem Verhalten. Je mehr Informationen bezüglich des Verhaltens vorhanden sind, desto eher kann eine passende Verteilung ausgewählt und kalibriert werden. Fehlen jedoch Detailinformationen, aber existieren grundsätzliche Werte wie die Minimal- und Maximalgrenze oder auch der wahrscheinlichste Wert, dann bieten etwa die Normalverteilung oder Gleichverteilung Potential zur Beschreibung von Unsicherheiten.

Bei der Aggregation von Normalverteilungen besitzen diese einen entschiedenen Vorteil. Während die anderen Verteilungen mithilfe von Simulationen aggregiert werden können, besteht bei Normalverteilungen auch die Möglichkeit, diese ohne approximativen Methoden zu einer Gesamtverteilung zu aggregieren (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 38) und Iman & Conover (1982, S. 326)). Eine besondere Beachtung bei der Aggregation finden

dabei die Abhängigkeiten, die in Form von Korrelationen beschrieben werden können. Eine Missachtung der Abhängigkeiten in Form von unkorrelierten Risiken kann zu einer gravierenden Unterschätzung der Gesamtverteilung führen (vgl. beispielsweise Wall (1997)). Bei der Normalverteilung besteht im Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ein etabliertes Maß für lineare Abhängigkeiten (vgl. Bakhshi & Touran (2012, S. 134)).

Generell ist eine Kategorisierung der Korrelationen möglich, wobei die Zuteilung einer erkannten Korrelation in eine bestimmte Kategorie eine detaillierte Interpretation der Ergebnisse erfordert. Eine hohe Korrelation von Merkmalen bietet dabei Hinweise, dass diese Merkmale von einer anderen Größe, die nicht gemessen beziehungsweise noch unbekannt ist, abhängen (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 505)). Hierfür ist eine detaillierte Betrachtung im Anwendungsfall notwendig.

Zusammenfassung der für diese Arbeit bedeutenden Literatur zur Quantifizierung von Unsicherheiten

Es existiert eine Vielzahl von Veröffentlichungen, die das Thema der Quantifizierung von Unsicherheiten beinhalten. Ausgehend von Markowitz (1959) zeigt vor allem Touran in diversen Veröffentlichungen (vgl. Touran (2014), Touran & Suphot (1997), Touran (1993) und Touran & Wisser (1992)) ein Vorgehen zur allgemeinen Umsetzung der Unsicherheitenmodellierung unter Berücksichtigung von Korrelationen. Die angeführten Autoren gehen bei der Ermittlung der Korrelationen der Risiken unterschiedliche Wege, die sich jedoch nur beschränkt für diese Arbeit eignen und mit einer zusätzlichen Vorgehensweise ergänzt werden. Eine zusätzliche Basis bildet die Analyse von Wall (1997), die der Berücksichtigung von Korrelationen mehr Bedeutung als der Wahl der bestgeeigneten Art der Verteilung beimisst. Ein Umsetzungsbeispiel für die Unsicherheitenmodellierung im Rahmen der Fabrikplanung liefert die Arbeit von Rimpau (2010), die jedoch die Auswirkungen der Abhängigkeiten vernachlässigt. Aufgrund der von den anderen genannten Autoren festgestellten besonderen Bedeutung der Korrelationen für die Risikoaggregation liegt der Fokus der vorliegenden Forschung auf der Analyse dieser Abhängigkeiten.

2.8 Zwischenfazit

Eine Methodik für die Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung beinhaltet mehrere Schnittstellen zu anderen Fachgebieten. In dieser Arbeit werden die Schnittstellen von der Fabrikplanung zur Angebotslegung, zum Risikomanagement und zu statistischen Methoden betrachtet. Jedes Fachgebiet bietet spezifische Werkzeuge und Methoden, um mit besonderen Herausforderungen umgehen zu können. Um innerhalb der Schnittmenge der vier Fachgebiete Unsicherheiten quantifizieren zu können,

bietet die Stochastik viele Vorteile und sie genügt auch den vielfältigen Anforderungen, die in dieser Arbeit an die zu entwickelnde Methodik gestellt wird.

In allen Fachgebieten existiert ein etablierter Stand der Technik, der auch einen Umgang mit Unsicherheiten vorsieht. Dennoch können Forschungslücken für den Anwendungsfall der frühen Fabrikplanung mit folgenden Aussagen zusammengefasst dargestellt werden:

- Bei der Quantifizierung und Aggregation von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung werden Korrelationen bisher ungenügend mitberücksichtigt. Korrelationen spielen jedoch eine besonders bedeutende Rolle bei der Aggregation von Unsicherheiten, deren Einfluss auf das Gesamtrisiko sogar die Wahl der Verteilung zur Quantifizierung der einzelnen Unsicherheiten übertrifft. (vgl. Khodakarami & Abdi (2014), Yang (2011), Chou et al. (2009), Cooper et al. (2005), Gleißner (2001), Wall (1997), Touran (1993) und Iman & Conover (1982))
- Korrelationen von Kosten werden größtenteils durch gemeinsame Faktoren ausgelöst (vgl. Wang (2002*b*)). Eine Analyse der Kostenfaktoren im Hinblick auf die Korrelationsanalyse im Zuge der Risikobetrachtung von Fabrikplanungen fehlt jedoch bisher.
- Die Ermittlung der Korrelationen bietet in der Praxis eine besondere Herausforderung. Generell bestehen dazu zwei Wege, einerseits über Berechnung mittels historischer Daten und andererseits über Expertenschätzungen (vgl. Touran (1993)). Während vielfach historische Daten in ausreichender Qualität fehlen, bieten Expertenschätzungen nur eingeschränkte und subjektive Möglichkeiten zur Quantifizierung der Korrelationen (vgl. Gleißner (2014), Yang (2008) und Touran (1993)). Nachdem beide Wege mit Nachteilen behaftet und auch nur eingeschränkt anwendbar sind, besteht ein aktueller Mangel an einem dritten Weg zur Erhebung der Korrelationen, der eine vorteilhaftere Anwendung bietet.

Die Forschung in dieser Arbeit konzentriert sich somit auf die identifizierten Forschungslücken und versucht, eine gesamtheitliche Methodik für die beschriebene Problemstellung zu entwickeln.

3 Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten

3.1 Vorgehensweise zur Methodik- und Modellentwicklung

In den betroffenen Wissensgebieten Fabrikplanung, Angebotslegung, Risikomanagement und Statistik existieren verschiedene Werkzeuge und Methoden. Gleichzeitig finden in verschiedenen Fachrichtungen Unsicherheitsquantifizierungen und Risikobetrachtungen ihre Anwendung. In diesem Kapitel wird beschrieben, inwiefern bestehende Werkzeuge und Methoden adaptiert und übertragen werden können, wobei eine detaillierte Beschreibung der Detailanforderungen und Systemabgrenzung vorausgeht (vgl. Wiendahl (2011, S. 34 f.)).

Ausgehend von den allgemeinen Beschreibungen in den Wissensgebieten wird nach dem Deduktionsprinzip vom allgemeinen auf den speziellen, in dieser Arbeit betrachteten Fall, der mit Anforderungen und Systemgrenzen spezifiziert wird, geschlossen (vgl. Töpfer (2009, S. 131)). Für die identifizierte Forschungslücke wird hingegen eine Lösung für den Anwendungsfall nach dem Induktionsprinzip gesucht und im Zuge der Verifikation und Validierung in Kapitel 5 hinsichtlich der Anwendbarkeit in einer allgemeinen Form überprüft (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 300)).

Im Mittelpunkt der Methodik steht die Modellbildung eines quantitativen Modells, das zur Quantifizierung der Unsicherheiten und Aggregation der Risiken dienen soll. Hierfür werden die ermittelten Merkmale qualitativ und quantitativ in Verbindung gesetzt (vgl. Wiendahl (2011, S. 35)), wobei die in Kapitel 2.3.4 beschriebenen Merkmale eines Modells (Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal) als Hilfestellung dienen.

Nach der Erstellung des Modells werden die Möglichkeiten zu dessen Anwendung in Form einer allgemeinen Methodik beschrieben.

In Abbildung 3.1 wird das Vorgehen zur Methodikentwicklung in einer Übersicht dargestellt.

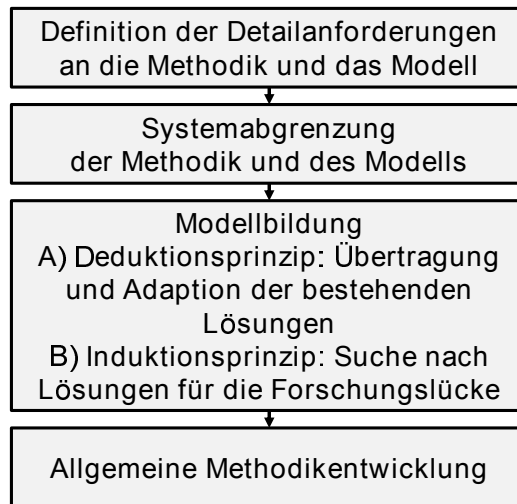


Abb. 3.1: Vorgehen zur Methodik- und Modellentwicklung (eigene Darstellung in Anlehnung an Wiendahl (2011, S. 34 f.) und Töpfer (2009, S. 131))

3.2 Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik

Bei der Anforderungserhebung für das mathematische Modell und die Methodik muss grundsätzlich berücksichtigt werden, welche Ziele mit der Einführung dieser Methode in einer Planungsumgebung verfolgt werden. Die Ziele werden im Hinblick auf die unterschiedlichen Anwender getrennt. Auf der einen Seite befindet sich der Planungsexperte, der im Zuge der frühen Phase möglichst effizient Fabrikplanungen durchführt. Aufgrund vielfältiger Gründe treten Unsicherheiten in dieser Planung auf, mit denen der Planer zurechtkommen muss. Genau diesem Experten sind die Unsicherheiten bewusst und auch in der Größe einschätzbar. Ein Modell zur Abbildung dieser vorhandenen Information birgt im ersten Schritt das Potential, die Unsicherheiten zu kommunizieren und zu dokumentieren. Die Kommunikation dieser Zusatzinformation richtet sich an Planungsexperten, die ebenfalls an derselben Planung beteiligt sind sowie an die Entscheidungsträger, die für die notwendigen Mittel bezüglich der Umsetzung sorgen und somit die andere Seite repräsentieren. Bei der Diskussion mit anderen Planungsexperten können die Unsicherheiten im jeweiligen Anwendungsfall verifiziert, unbeachtete Detailfragen aufgedeckt und dafür Problemlösungen gefunden sowie Abhängigkeiten zueinander definiert werden.

Gerade bei Märkten, bei denen der Wettbewerb steigt und sich der Druck auf die Unternehmen erhöht, die Vorteile im Wettbewerb zu bewahren, wird besonderer Fokus auf die Produktkosten gelegt (vgl. Roy et al. (2011, S. 694)). Frühzeitige Planungen von Fabriken müssen somit vor allem die kostenmäßige Umsetzbarkeit des Vorhabens aufzeigen. Vor allem bei Unternehmen mit wenigen, großen Verträgen erhöht sich der Druck, möglichst exakte Planungen durchzuführen. Aus diesem Grund besitzt die Kostenbestimmung besondere Wichtigkeit. Gerade versteckte Aufschläge und unklare Kostenermittlungen er-

schweren die Entscheidung, ab welcher Grenze ein Vorhaben wirtschaftlich umsetzbar ist. Ein Hauptziel kann mit der vollkommen transparenten Kostendarstellung inklusive Unsicherheitsbereich definiert werden. Dadurch kann auf aggregierter Gesamtebene entschieden werden, welche Kosten für die Umsetzung angesetzt werden und welches Risiko in Kauf genommen wird, dass die tatsächlichen Kosten über den geplanten liegen. Ziel ist somit eine quantifizierte Aussage bezüglich des Gesamtrisikos je Fabrikplanung. Ähnlich der Definition, dass Daten zu Informationen werden, wenn diese organisiert sind, werden Unsicherheiten zu Risiken, wenn diese quantifiziert sind (vgl. Roy et al. (2011, S. 695)). Nur über die Definition der Risiken können entsprechende Risikomaßnahmen und -strategien umgesetzt werden. Die Methodik zielt darauf ab, eine umfangreiche Analysemöglichkeit zu bieten, um zu eruieren, aus welchen Gründen das Risiko in dieser Höhe zustande gekommen ist und mit welchen Detailoptimierungen das Gesamtrisiko minimiert werden kann. Es soll somit gezeigt werden, wo die Hebeln mit dem größten Potential sind, um das Gesamtrisiko zu minimieren.

An die Methodik sowie an das mathematische Modell zur Berücksichtigung der Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung werden folgende Anforderungen auf Basis der Zielformulierung gestellt, um eine bestmögliche Eingliederung der Methodik in den Fabrikplanungsprozess zu gewährleisten. Diese Anforderungen wurden in den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experteninterviews und Workshops erhoben beziehungsweise bestätigt. Abschließend werden die erhobenen Anforderungen mit den in der Arbeit von Rimpau (2010, S. 73 ff.) ermittelten, generischen Anforderungen für eine Risikomethodik verglichen und auf Gemeinsamkeiten überprüft.

Für die Methodik besteht die Herausforderung, sich möglichst gut und mit geringem Aufwand in bestehende Planungsprozesse einzugliedern und die Prozesse an sich nicht zu verändern. Auch wenn jedes Unternehmen und jede Branche eigene Planungsprozesse besitzt, sind in der Literatur übergeordnete Prozesse vorhanden (vgl. unter anderen Wiendahl et al. (2009), Bracht et al. (2011) und Grundig (2013)). In Kapitel 3.3.1 wird auf die berücksichtigten Planungsphasen in der Fabrikplanung eingegangen. Die Methodik soll ein Werkzeug zur Verfügung stellen, mit dem für den Planer kein spürbar großer Zusatzaufwand notwendig ist, um neben der Haupttätigkeit der Planung auch die Unsicherheiten zu quantifizieren. Quantifizierung bedeutet in dieser Hinsicht die Dokumentation des impliziten Wissens. Bei großen Projekten werden die einzelnen Fertigungsschritte in einzelne Abteilungen bzw. Gewerke unterteilt und von einem jeweiligen Spezialisten geplant. Genau diese Spezialisten besitzen das Wissen über die Unsicherheiten und sind für die Quantifizierung mit der entwickelten Methodik zuständig.

Als Output soll eine transparente Darstellung des Gesamtrisikos basierend auf den Risiken in der frühen Fabrikplanung generiert werden. Es besteht der Anspruch, dass die einzelnen Risiken quantifiziert abgebildet werden. Gleichzeitig soll auch die Möglichkeit bestehen, die Detailrisiken der Gewerke zu analysieren, um spezifische Maßnahmen ab-

leiten zu können. Aus diesem Grund ist die transparente Darstellung des Gesamtrisikos sowie der Detailrisiken eine Grundvoraussetzung für die Methodik.

Das mathematische Modell ist das Rückgrat des Systems, das die Abhängigkeiten der Risiken abbildet und die Aggregation eines Gesamtrisikos ermöglicht. Es soll nachvollziehbar machen, wodurch die Risiken in der Planung entstehen. Es ist somit notwendig, Ursachen- und Wirkungsaussagen bezüglich der Risiken analysieren zu können. Bei den Ursachen- und Wirkungszusammenhängen ist besonders auf die gegenseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Dimensionierungsgrößen Rücksicht zu nehmen (vgl. Wall (1997, S. 250)).

Für umfangreiche Analysemöglichkeiten muss im Modell möglich sein, die Kosten zu spezifischen Detailkosten zu aggregieren und auf Basis dieser Teilaggregationen weitere Aggregationen durchzuführen. Eine Übersicht soll durch eine Gesamttaggregation des Bedarfes zu einem Überblickswert gegeben sein. Hierdurch soll die Analyse der Gesamtkosten je Gewerk beziehungsweise je Dimensionierungsgröße ermöglicht werden.

In Tabelle 3.1 werden die Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik überblicksmäßig dargestellt. Rimpau gliedert in seiner Arbeit die Bewertungskriterien an eine Risikomethode in der Angebotsphase anhand der Transparenz, Verursachergerechtigkeit, Ganzheitlichkeit, Flexibilität und Risikoorientierung (vgl. Rimpau (2010, S. 74)). Transparenz, Flexibilität und Risikoorientierung haben auch für diese Arbeit uneingeschränkt Gültigkeit, wobei sie infolge der Erhebung für die Anwendung präzisiert wurden. Die Kriterien der Verursachergerechtigkeit und Ganzheitlichkeit werden an diese Methodik nur bedingt gestellt, da Effizienz in der Anwendung im Vordergrund der Beurteilung steht. Aus diesem Grund wird nach einer Methodik gesucht, mit der es möglich ist, Risiken nicht auf der Ebene des höchsten Detaillierungsgrades zu erheben und dort direkt dem Verursacher zuzuweisen, sondern auf einer mittleren Ebene anhand der Dimensionierungsgrößen unter Einbindung der Gewerke zu quantifizieren. Die Ermittlung der Abhängigkeiten der Risiken zueinander kann auf mittlerer Ebene ebenso effizient aufgrund der begrenzten Anzahl an möglichen Kombinationen durchgeführt werden.

3.3 Systemgrenzen

Die im Folgenden definierten Systemgrenzen schränken den Anwendungsraum der entwickelten Methodik ein. Für diese Grenzen wurde sie entwickelt und das Modell erarbeitet.

Bereich	Anforderung
Methodik	geringer Zusatzaufwand für Planer
Methodik	transparente Darstellung des Gesamtrisikos
Methodik	transparente Darstellung der Detailrisiken
Methodik	Analysemöglichkeit bzgl. Ursachen- und Wirkungszusammenhänge der Risiken
Methodik	Analysemöglichkeit hinsichtlich des quantifizierten Gesamtrisikos
Mathematisches Modell	nachvollziehbare Ermittlung der Risiken
Mathematisches Modell	quantifiziertes Gesamtrisiko
Mathematisches Modell	quantifiziertes Detailrisiko
Mathematisches Modell	Abbildung der Ursachen- und Wirkungszusammenhänge der Risiken
Mathematisches Modell	Abbildung der Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen
Mathematisches Modell	Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu Gesamtkosten
Mathematisches Modell	Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu spezifischen Kostenzusammenfassungen

Tab. 3.1: Überblick über die Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik: Unsicherheiten in der Fabrikplanung; eigene Analyse in Anlehnung an Rimpau (2010, S. 74)

3.3.1 Fabrikplanung

Fabrikplanung beinhaltet ein breites Spektrum an Methoden, Werkzeugen, Detaillierungsgraden und zeitlicher Terminierung. Im Folgenden soll abgegrenzt werden, auf welche Teile der Fabrikplanung sich diese Arbeit bezieht.

Fabrikplanungsphasen

In der frühen Fabrikplanungsphase besteht ein besonderer Bedarf für eine Methodik zum Umgang mit Unsicherheiten, wie in Kapitel 2.3.6 ausführlich beschrieben ist. Im Zuge dieser Arbeit wird ganz spezifisch diese Phase mit ihren besonderen Anforderungen behandelt.

Die frühe Fabrikplanungsphase bietet die Grundlage für die weiteren Planungsschritte sowie für die nachfolgende Umsetzung. Im Zuge der fortschreitenden Planung werden viele Unsicherheiten nach und nach reduziert und eliminiert. Während der laufenden Umsetzung sind zusätzlich reale Daten aus der Produktion der verschiedenen Gewerke zugänglich. Es ist zielführend, die Methodik für spätere Fabrikplanungsphasen adaptierbar zu gestalten, um im Zuge von Lessons-Learned-Schleifen die anfänglich geplanten Unsicherheiten mit den realen Daten zu überprüfen, wie in Abbildung 3.2 dargestellt ist.

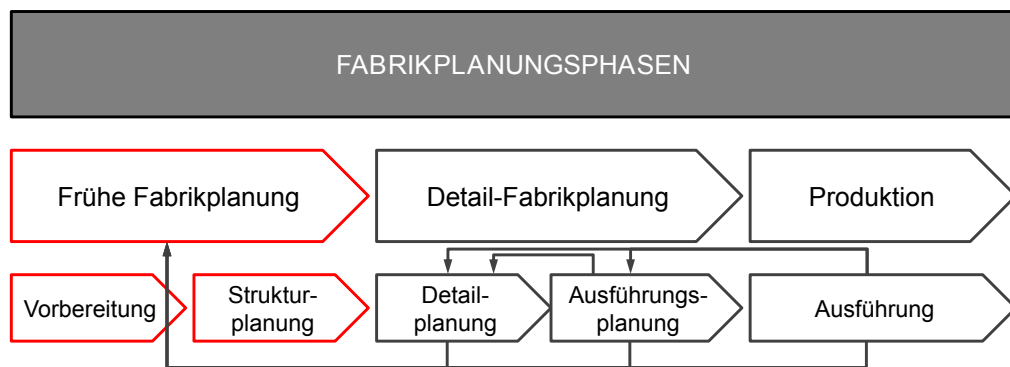


Abb. 3.2: Darstellung der Lessons-Learned-Schleifen zwischen den Fabrikplanungsphasen (eigene Darstellung in Anlehnung an Grundig (2013, S.38))

Lessons-Learned-Schleifen sind ein wichtiger Bestandteil des kontinuierlichen Verbesserungsprozesses und finden im Zuge einer Projektabwicklung nach Ende des Projektes beziehungsweise nach Überschreitung von essentiellen Meilensteinen statt (vgl. Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.) (2014, S. 88)). Bei großen Fabrikplanungsprojekten kommt es im Zuge der Detailplanung, der Ausführungsplanung sowie während des und nach dem Betrieb zu einem entscheidenden, schrittweisen Informationsgewinn, der ein kritisches Betrachten der vorangegangenen Phasen mit entsprechendem Wissensgewinn im Zuge von Lessons-Learned-Phasen ermöglicht. Im Zuge der Prozessbeschreibung der Methodik in Kapitel 3.5 wird auf den genauen Datenaustausch zwischen den einzelnen Planungsphasen eingegangen. Durch eine langjährige Anwendung und Selbstüberprüfung der eigenen Werte kann die Treffsicherheit der Methode erhöht werden, indem die Daten aus der frühen Phase mit Detailplanungsdaten, Ausführungsplanungsdaten bzw. realen Daten aus der Produktion verglichen werden. Eine nötige Voraussetzung hierfür sind vergleichbare Projektprämissen. Am einfachsten fällt ein Vergleich bei gleichgebliebenen Prämissen, wobei hiervon in einer realen Projektumgebung nicht ausgegangen werden darf. Die Prämissen können sich häufig auch nach Angebotslegung und Vertragsabschluss ändern. Für die Datenaufbereitung muss mit entsprechendem Aufwand gerechnet werden, was einer einfachen und effizienten Anwendung von Lessons-Learned-Schleifen entgegenwirkt und diese im ungünstigsten Fall verhindert.

Fabrikplanung in Verbindung mit dem Angebotsprozess

Ist die Produktion und Fabrikplanung eine Leistung, die an einen Kunden verkauft wird, so besteht eine prozesstechnische Verbindung der Fabrikplanung mit der Angebotslegung. Nach Eingang einer Kundenanfrage und der Entscheidung des Auftragsfertigers, ein Angebot zu legen, beinhaltet die Angebotslegung eine technische Kalkulation zur Festlegung des Bedarfs an Produktionsfaktoren und eine kaufmännische Kalkulation zur monetären Bewertung des Bedarfs.

Mit der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf die technische Kalkulation gelegt, wobei der Output der frühen Fabrikplanung dieser Kalkulation entspricht. Eventuelle Gemeinkosten- und Gewinnzuschlagskalkulationen finden in der kaufmännischen Kalkulation statt, die jedoch nicht näher betrachtet wird. In der vorliegenden Methode stellt die kaufmännische Kalkulation Inputfaktoren zur Verfügung, die die kalkulierten Mengen an Ressourcen aus der technischen Kalkulation auf die gemeinsame Einheit einer Finanzwährung transferiert. Erst mithilfe einer gemeinsamen Einheit können gesamtheitliche Analysen und Vergleiche angestellt werden, die als Entscheidungsgrundlagen für ein zu tragendes Risiko aufgrund der Unsicherheiten in der technischen Kalkulation dienen. Diese ganzheitliche Bewertung der Mengen benötigt eine Definition der gemeinsamen Kosten, wobei die verbrauchsorientierte Kostendefinition nach Schmalenbach (1919) und Gutenberg (1951) bei Produktionsstätten anwendbar ist. Dabei können Kosten durch die Bewertung des Einsatzes von Produktionsfaktoren, die zur Erstellung der Leistung dienen, ermittelt werden (vgl. Schwaiger (2013, S. 12).

Eine bestimmende Größe während der Angebotserstellung ist die Bearbeitungszeit. Trotzdem in vielen Betrieben bereits Standardisierungen und Modularisierungen eingeführt sind, wird von vielen Unternehmungen weiterhin eine Reduktion der Bearbeitungszeit zwischen Eingang der Kundenanfrage und Ausgang des Angebots für notwendig erachtet (vgl. Schuh et al. (2008, S. 32)). Eine eingeschränkte Bearbeitungszeit für den gesamten Prozess der Angebotslegung beeinflusst den Detailprozessschritt der technischen Kalkulation. In der frühen Fabrikplanungsphase, als entscheidender Tätigkeitsbereich in der Planung von Produktionsprojekten, besteht somit die zentrale Anforderung, in stark beschränktem Zeitrahmen unter Einsatz begrenzter Ressourcen, nämlich der Planungsexperten, qualitativ entsprechende Planungen durchzuführen. Eine Ursache für Unsicherheiten liegt somit in der beschränkten Zeit, in der Planungen durchgeführt werden. In dieser beschränkten Zeit sind detaillierte Planungen nicht möglich. Es liegt somit in der Natur der Sache, dass die Planungsmethoden ermöglichen sollen, mit Unsicherheiten umzugehen. Wiendahl spricht hierbei von einem Toleranzbereich der Kostenabweichungen, der mit fortschreitender Planung immer enger wird (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 511 f.)). Innerhalb der Systemgrenze der hier vorgestellten Methodik liegt die Zusammenführung der technischen und kaufmännischen Kalkulation, die als zusätzlichen Input die monetäre Bewertung zu jeder Mengeneinheit zur Verfügung stellt, wie in Abbildung 3.3 dargestellt ist. Der Output der kaufmännischen Kalkulation von Fabriken gliedert sich im Speziellen in drei Dimensionierungsgrößen: Die notwendigen Betriebsmittel, die notwendigen Flächen und das notwendige Personal (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 463 f.)).

Digitale Fabrik

Das in der VDI-Richtlinie 4499 definierte Ziel einer Ganzheitlichkeit in der Planung, Evaluierung und laufenden Verbesserung der realen Fabrik mit einem umfassenden Netzwerk

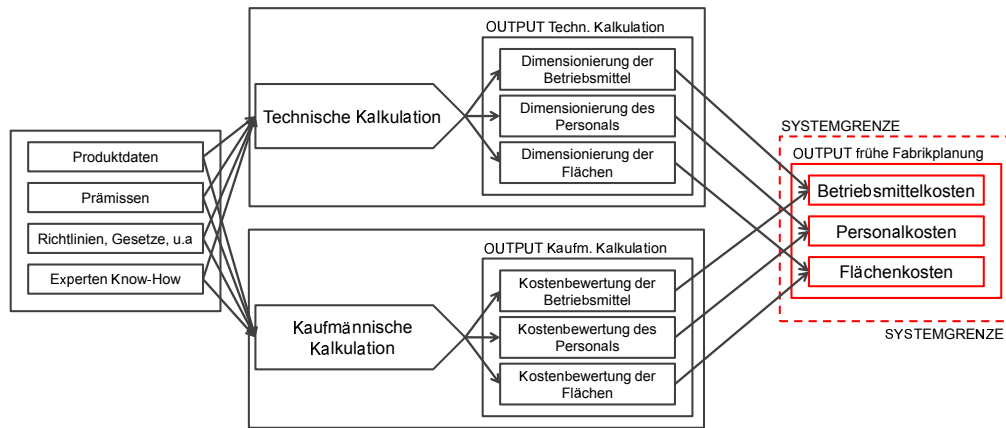


Abb. 3.3: Schematische Darstellung der Systemgrenzen der erarbeiteten Methodik für die frühe Fabrikplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Wiendahl et al. (2009, S. 463))

aus digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen ist eine wichtige Anforderung im Zuge von Methodenentwicklungen von Fabrikplanungen (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S. 3)). Dieses Netzwerk wird dabei durch ein durchgängiges Datenmanagement ermöglicht. Gerade dadurch sind effiziente Lessons-Learned-Schleifen, wie sie in Kapitel 3.3.1 gefordert werden, möglich. Die Digitale Fabrik begleitet das Produkt von der Idee bis zum Produktlebensende. Das in dieser Arbeit erstellte Modell legt den Fokus auf die zwei Prozesse „Montage und Fertigungsprozessplanung“ sowie „Planung der Fertigungsanlagen“ (vgl. Abbildung 3.4).

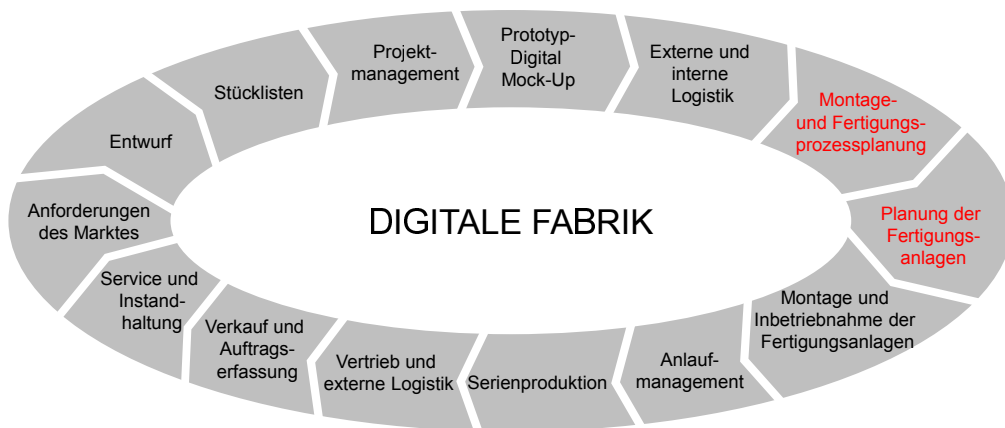


Abb. 3.4: Darstellung der Prozessschritte der Digitalen Fabrik im Zuge der frühen Fabrikplanung (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S.5))

Die Digitale Fabrik beschreibt für die zwei betroffenen Prozesse sowie für den Prozessschritt externe und interne Logistik die Gesamtplanungsumfänge im Zuge der Fabrikplanung. Die in Kapitel 3.3.1 getroffenen Einschränkungen hinsichtlich der alleinigen Betrachtung der frühen Fabrikplanungsphase bleibt weiterhin bestehen. Jedoch stellt die

Definition der Digitalen Fabrik die Anforderung an die Methodik, in ein durchgängiges Datenmodell eingliederbar zu sein und somit einen Datenaustausch mit den anderen Phasen zu ermöglichen. Die Daten im Zuge der frühen Fabrikplanung werden auf einer höheren Aggregationsstufe erstellt und betrachtet. Sie resultieren aus einer unterschiedlichen Datenbasis, wobei diese im Zuge des Projektes immer detaillierter wird. Die Hauptplanungsvariablen bleiben jedoch über alle Detaillierungsebenen bis über die Umsetzung hinaus bestehen. Eine durch die VDI-Richtlinie 4499 vorgeschlagene Vorverlagerung der Tätigkeiten und somit eine Verbesserung des Reifegrades in frühen Phasen gibt der frühen Fabrikplanungsphase eine höhere Bedeutung, verändert jedoch nicht die Tatsache, dass bei jedem Projekt ein Startpunkt gesetzt werden muss, bei dem Unsicherheiten in der Planung, trotz durchgehenden Datenmodells, auftreten. Eine frühzeitige Messbarkeit dieser Unsicherheiten befähigt ein Unternehmen, sein Risiko in der Planung zu beurteilen und gegebenenfalls entsprechende Maßnahmen zu setzen. Das Wissen über die Unsicherheiten in der Planung gibt dem Unternehmen die Möglichkeit, auf diese zu reagieren.

3.3.2 Unsicherheiten

Während der Planung vorhandene Unsicherheiten sind zentraler Bestandteil bei Planungstätigkeiten. Eine systematische Beschreibung der Unsicherheiten gibt dem Unternehmen die Möglichkeit, geeignete Strategien entsprechend der entstandenen Chancen und Risiken zu entwickeln und umzusetzen.

Einteilung der Unsicherheitsarten

Eine zentrale Bedeutung im Zuge der Fabrikplanung kommt der Betrachtung von Produkt-, Prozess- und Ressourceninformationen zu (vgl. Bracht et al. (2011, S.288)). Eine Konzentration auf diese drei Hauptfaktoren ermöglicht eine effiziente, umfassende Fabrikplanung, wobei ein übergreifendes, ganzheitliches Konzept zur Kombination der drei Faktoren im Zuge der Digitalen Fabrik notwendig ist (vgl. Bracht et al. (2011, S.288)). Die Informationen hinsichtlich des Produktes, der Prozesse und der Ressourcen können als Basis herangezogen werden, um in der Planung vorkommende Unsicherheiten zu gliedern. Zusätzlich wird die Gliederung um die Produktionsinformationen erweitert, in der zusätzliche Anforderungen hinsichtlich der Produktion zusammengefasst werden (vgl. Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008, S. 5 f.)).

Der Begriff Produktinformation beinhaltet die vollständige Information über das zu produzierende Produkt und berücksichtigt beispielsweise Informationen über die Maße eines Fahrzeuges, die verwendeten Materialien, aber auch über die Anzahl der Schweißpunkte, die als Verbindung der Karosserieeinzelteile dienen (vgl. Bracht et al. (2011, S. 288) und Unzeitig, Schafler, Stocker, Weghofer & Flasch (2014)). Unsicherheiten treten an dieser

Stelle unter anderem aufgrund von Concurrent Engineering Ansätzen auf, wobei über die Parallelisierung von Entwicklungstätigkeiten und Fabrikplanungstätigkeiten eine zeitreduzierte Produktrealisierung angestrebt wird (vgl. Kuster et al. (2011, S. 154)). Zusätzliche Faktoren sind beispielsweise Endkundenanforderungen, die sich im Zeitraum vom Entwicklungsstart bis zur oder auch während der eigentlichen Produktion ändern können. Gerade in der frühen Fabrikplanung stehen die Planer vor der Herausforderung, die Produktion trotz nicht vollständig vorhandener Produktdaten zu dimensionieren. Dies kann in vereinzelt Fällen auch lediglich eine Produktskizze ohne weitere Details sein. Diese Unsicherheiten sind der Ausgangspunkt für die Dimensionierung und Teil der geforderten Unsicherheitsmodellierung.

Produktionsinformationen enthalten spezifische Daten über die Anforderungen an die Produktion, die über die Produktinformationen hinausgehen. Eine der größten Kostentreiber, die Stückzahl, stellt eine charakteristische Größe dafür dar, entsprechende Unsicherheiten mit sich zu führen. Eine starke Abhängigkeit von der Marktforschung mit Prognosen über Verkaufszahlen und Ausprägung von Ausstattungsmerkmalen lässt sich hierbei feststellen. Die Dimensionierung der Fabrik steht unter großer Abhängigkeit von diesen Informationen.

Auf Basis der Produkt- und Produktionsinformationen werden im Zuge der Planung geeignete Prozesse ausgewählt, mit denen das Produkt hergestellt werden kann. Aufgrund zeitlicher sowie budgetärer Beschränkungen werden im Zuge der frühen Phase keine Details simuliert und geplant. Als Beispiele für die Beschränkungen können angeführt werden: Teilgrößen werden in verschiedene Klassen zur Ermittlung der Bearbeitungszeit eingeteilt, Standardwerte werden für Bearbeitungszeiten verwendet, sowie Zugänglichkeiten und Fahrwege abgeschätzt. Durch diese Verallgemeinerungen, Standardisierungen und Abschätzungen treten wieder Unsicherheiten im Zuge der Planung auf.

Der letzte große Tätigkeitsbereich im Zuge der Planung besteht aus der Zuordnung von Ressourcen zu den Produktionsprozessen, die notwendig sind, um diese Prozesse auszuführen. Den Output der Fabrikplanung stellt in weiterer Folge die Dimensionierung der Betriebsmittel, der Flächen und des Personals (vgl. Kapitel 3.3.1) dar. Unsicherheiten können an dieser Stelle hinsichtlich der Kostenentwicklung der Ressourcen und der Fähigkeiten der Ressourcen (aufgrund der Neuentwicklungen von Betriebsmitteln, Weiterbildungen von Mitarbeitern etc.) auftreten. Diese Gliederung der Unsicherheiten bildet den dritten Punkt der Unsicherheiten, die in dieser Methodik abgebildet werden.

Außerhalb der Systemgrenzen der Methodik liegen typische finanzmathematische Unsicherheitsfaktoren wie Kreditunsicherheiten, Versicherungsunsicherheiten, Liquiditätsunsicherheiten, Lieferantenausfallunsicherheit. Für diese Unsicherheiten gibt es in der Finanzmathematik und deren Forschung verschiedene Ansätze zur Modellierung, siehe hierzu Kapitel 2.7. Im Zuge dieser Arbeit wird jedoch der Fokus auf die Unsicherheiten im Zuge der Fabrikplanung gelegt.

In Abbildung 3.5 wird die Einteilung der Unsicherheiten im Zuge der Fabrikplanung dargestellt.

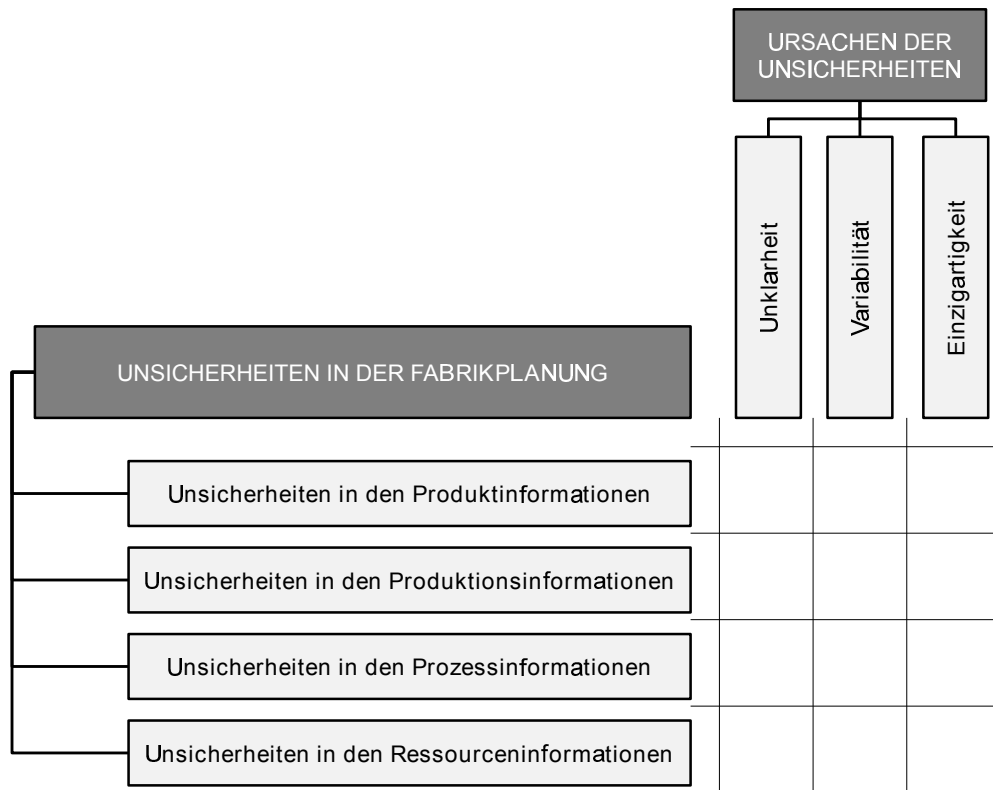


Abb. 3.5: Überblick über die Einteilungen von Unsicherheiten und deren Ursachen für das Auftreten im Zuge der Fabrikplanung (Unzeitig, Rubesa, Schafler, Stocker, Ramsauer & Flasch (2014) in Anlehnung an Khodakarami & Abdi (2014, S. 1))

Unsicherheiten können aufgrund verschiedener Ursachen auftreten, wobei diese in drei Gruppen zusammengefasst werden können. In der ersten Gruppe werden Ursachen beschrieben, die sich auf die Einzigartigkeit des geplanten Vorhabens beziehen. Fehlen historische Daten und Erfahrungen von ähnlichen Produkten oder Projekten, treten Unsicherheiten aufgrund des Fehlens von Vergleichswerten auf. Die zweite Gruppe beinhaltet Ursachen, die mit einer Variabilität hinsichtlich der Projektperformanceindikatoren Zeit, Kosten und Qualität zusammenhängen. Bei jeder Umsetzung sind diese drei Größen Stellgrößen, die sich gegenseitig stark beeinflussen und vorab nur bedingt detailliert planbar sind. Zusätzlich werden Unklarheiten in den vier definierten Informationskategorien in einer eigenen Gruppe zusammengefasst. (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 1))

3.3.3 Kosten

Es existieren für Produktionsunternehmen verschiedene Kostenberechnungsmodelle, die keinem einheitlichen Regelwerk unterliegen. In dieser Arbeit steht das Verursacherprinzip der Kosten im Vordergrund, wobei die Orientierung am zukünftigen, geplanten Ver- und Gebrauch erfolgt. Die Mengen an Produktionsfaktoren und Ressourcen stellen den Output der Planung dar. Im darauffolgenden Schritt werden diese Mengen mithilfe der Kostenrechnung monetär bewertet. Die Mengen werden durch den Einsatz von Ressourcen, der zur Leistungserstellung dient, verursacht. Die zugrundeliegende Methode der Kostenrechnung ist nicht in der Betrachtung dieser Arbeit und das Ergebnis der Kostenbewertung wird als Input für das Modell verwendet. (vgl. Schwaiger (2013, S. 11 ff.))

Die Kosten eines Produktes können ganz allgemein anhand einer Kostenstruktur in Material- Personal- Technologie-, Geld- und sonstige Kosten eingeteilt werden, wie in Abbildung 3.6 dargestellt wird (vgl. Schwaiger (2013, S. 11 ff.)). In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Personal- sowie Technologiekosten gelegt, um die Auswirkungen der wertschöpfenden Tätigkeit näher betrachten zu können. Die Wertschöpfung in der Produktion benötigt sowohl eine bestimmte Anzahl an Personal, sowie eine bestimmte Menge an Betriebsmittel und verursacht dadurch Kosten (vgl. Roy et al. (2011, S. 698 f.)). Die Kosten im Hinblick auf das Personal werden als Personalkosten und diejenigen hinsichtlich der Betriebsmittel als Technologiekosten bezeichnet (vgl. Schwaiger (2013, S. 23)). Bei Materialkosten kann eine Unterscheidung in Rohmaterialien, Zukaufteilen und zuordenbare spezifische Overheadkosten, die mit der Administration des Einkaufs in Verbindung stehen, getroffen werden (vgl. Roy et al. (2011, S. 698)). Unter die Geldkosten fallen wiederum die Kosten für die finanziellen Ressourcen von Geld und Finanzinstrumenten (vgl. Schwaiger (2013, S. 36)). Kosten, die den ersten vier Kategorien nicht zugeordnet werden können, sind in der eigenen Rubrik „sonstige Kosten“ zugeordnet.

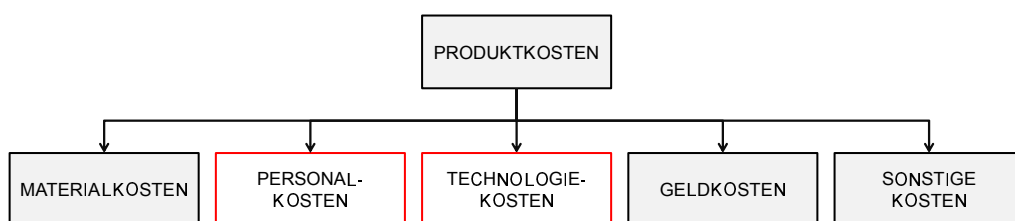


Abb. 3.6: Überblick über die Aufteilung der Produktkosten im Zuge der Produktion (eigene Darstellung in Anlehnung an Schwaiger (2013, S. 63))

Die Kosten im Zuge der Wertschöpfung beziehen sich auf die Umwandlung des Inputs in den Output der Produktionsstätte. Als Input können die Rohmaterialien und Zukaufteile verstanden werden. Zur Umwandlung werden Personal und Betriebsmittel in der Produktion benötigt. Die notwendigen Mengen werden im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase dimensioniert und als konkrete Zahlen geschätzt. Die Überführung der Dimensionierung

des einzelnen Mengenbedarfs in Kosten findet jedoch in dieser Arbeit keine nähere Betrachtung. Vielmehr steht im Mittelpunkt des Interesses, welche Unsicherheiten im Zuge der Dimensionierung entstehen und wie mit diesen Unsicherheiten umgegangen werden kann.

3.4 Modellbildung

Unsicherheiten werden unter der Bedingung zu kalkulierbaren Risiken, wenn die unsicheren Zustände messbar sind beziehungsweise vorhersehbar beschrieben werden, wie in Kapitel 2.5.2 erörtert wird. Für die Beschreibung des Verhaltens dienen oftmals mathematische Modelle, wie beispielsweise solche für die Entwicklung von Aktienportfolios, Modelle für Logistik innerhalb von Fabriken etc. (vgl. Markowitz (1959) und Bracht et al. (2011)). Modelle sind im eigentlichen Sinn ein Abbild der Wirklichkeit unter der Einschränkung von Annahmen und Vernachlässigungen und berücksichtigen damit das Verkürzungsmerkmal (vgl. Bracht et al. (2011, S. 79), Bronstein et al. (2000, S. 804) und Stachowiak (1973, S. 128 ff.)). Genauere Abbildungen beschreiben die Wirklichkeit realistischer, detaillierter und mit weniger Vernachlässigungen, während gröbere Abbildungen größtenteils mehr Annahmen und Vernachlässigungen beinhalten. Dennoch haben beide Modelle für die spezifische Anwendung ihren Nutzen und ihre Berechtigung. Der Anwender steht vor der Herausforderung, genau über die Fähigkeiten und Grenzen seiner Modelle Bescheid zu wissen und die richtige Auswahl für seine Anwendung zu treffen. Die Ergebnisse müssen dann immer vor dem Hintergrund der Systemgrenzen, Annahmen und Vernachlässigungen interpretiert werden.

Im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase werden für die Fabrikmodellierung aufgrund der begrenzten Zeit, Ressourcen und Informationen gröbere Modelle verwendet. Ziel dieser Arbeit ist, ein Modell zu entwickeln, das dem Fabrikplaner ein Werkzeug zur Verfügung stellt, mit dem er die in einer hohen Anzahl vorhandenen Unsicherheiten gerade in seiner herausfordernden Planungsphase quantifizierbar machen kann. Die Unsicherheiten werden somit zu Risiken, auf die der Planer in späterer Folge geeignete Wege des Umgangs entwickeln kann. Die Kenntnis über die Beschaffung der Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanungsphase und die Aggregation dieser zu einem Gesamtrisiko ist von zentraler Bedeutung für das Unternehmen hinsichtlich der nachfolgenden Detailentscheidungen sowie Preisverhandlungen im Zuge des parallel stattfindenden Angebotsprozesses.

Für Modellbildungen können in der Wissenschaft grundsätzlich zwei Vorgehensweisen gewählt werden. Zum einen existiert das datenbasierte Verfahren, bei dem von einer vorhandenen Datenmenge auf die allgemeinen Zusammenhänge geschlossen wird und diese dann modelliert werden (vgl. Töpfer (2009, S. 131 f.)). Zum anderen kann ein theoriebasiertes Vorgehen gewählt werden, in dem anhand einer verallgemeinerten Beschrei-

bung der Realität ein Modell für eine spezifische Anwendung geschaffen wird (vgl. Töpfer (2009, S. 131 f.)).

Im Falle der frühen Fabrikplanung besteht zwar die Möglichkeit des Vorhandenseins vieler Daten (siehe zum Beispiel Kapitel 4), jedoch können Schwierigkeiten auftreten, diese Daten aufgrund fehlender Konsistenz für ein deduktives Vorgehen in der Modellbildung heranzuziehen. Die Produktinformationen komplexer Produkte können sich bei einer Parallelisierung der Produktentwicklung und Fabrikplanung laufend in der frühen Fabrikplanungsphase ändern, wobei die Vollständigkeit der Dokumentation über Änderungen und die Zuordnung der entsprechenden Planung nicht gewährleistet werden kann. Aufgrund des Fehlens der Zuordnung Input zu Output der Planung können diese Daten nicht für eine Modellbildung herangezogen werden. Zusätzlich entstehen Schwierigkeiten, wenn Daten von stark unterschiedlichen Produktionen vorhanden sind, die keine geeignete Basis für zukünftige Produktionen bieten. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit bei der Modellbildung der Unsicherheiten ein Vorgehen ausgeschlossen, das ausgehend von einer historischen Datenmenge ein entsprechendes Modell entwickelt.

In der Theorie existiert eine Vielzahl von Modellen zur Unsicherheitsbeschreibung (vgl. Kapitel 2.7), die zu einem großen Teil aus anderen Fachgebieten stammen. Vor allem in der modernen Finanzmathematik, basierend auf der Portfolio-Theorie nach Markowitz (vgl. Markowitz (1959)), sind einige Modelle entwickelt worden, die als Basis für eine Risikobetrachtung in der Fabrikplanung dienen können. Eine besondere Herausforderung im Anwendungsfall stellen die Abhängigkeiten der einzelnen Planungsabteilungen voneinander dar. Gerade bei komplexen und variantenreichen Produkten mit entsprechend komplexen Produktions- und Logistikprozessen verursachen Änderungen in Detailbereichen ebenfalls Änderungen in einigen anderen, davon abhängigen Bereichen. Das Modell muss also in der Lage sein, Abhängigkeiten der einzelnen Unsicherheitspositionen voneinander zu berücksichtigen. Gerade hier bietet die Portfolio-Theorie einen geeigneten Ansatz. Als Ausgangsbasis wird somit nicht nur die allgemeine Beschreibung von Unsicherheiten herangezogen, sondern auch die spezifische Anwendung der Unsicherheitsbeschreibung in der Finanzmathematik im Umfeld der Portfolio-Theorie, wie in Kapitel 2.7.3 beschrieben wird. Die Übertragbarkeit der vorhandenen Modelle der Portfolio-Theorie in der Fabrikplanung wird überprüft und notwendige Adaptionen werden erarbeitet.

3.4.1 Gemeinsamkeiten und Unterschiede: Unsicherheiten bei Portfolios und Fabrikplanungen

Sowohl bei Portfolios von Finanzinstrumenten als auch bei frühen Fabrikplanungen treten Unsicherheiten auf. Um die Unsicherheiten in Form von messbaren und voraussagbaren

Chancen und Risiken abzubilden, besteht die Notwendigkeit, die Unsicherheiten mit entsprechenden mathematischen Modellen zu beschreiben. Bei diesen auf den ersten Blick andersartigen Problemen sind mit einer theoretischen Sichtweise viele Gemeinsamkeiten sowie auch Unterschiede ermittelbar.

Die frühe Fabrikplanung hat zum Ziel, die Fabrik für spezifische Produkte anhand der drei Größen Betriebsmittel, Flächen und Personal zu dimensionieren. Über die gemeinsame Einheit der Kosten werden die einzelnen Werte zu einem einzigen Übersichtswert aggregiert. Portfolios bestehen aus den gewichteten Anteilen verschiedener Finanzinstrumente. Ebenfalls kann über die gemeinsame Einheit des Wertes der Finanzinstrumente ein gesamter Portfoliowert aggregiert werden. Mit der Aggregation der Einzelwerte zu einem Gesamtwert wird die erste Gemeinsamkeit beschrieben.

Beiden Fachgebieten ist auch gemeinsam, dass ganz allgemein Unsicherheiten auftreten. Beide Male werden Einzelwerte, die mit Unsicherheiten behaftet sind, zu einem Gesamtwert aggregiert. Einerseits besitzt jedes Finanzinstrument bei Portfolios Unsicherheiten über die zukünftige Entwicklung des Wertes. Andererseits werden die einzelnen Dimensionierungsgrößen der Fabrikplanung für die Zukunft erstellt und sind bezüglich ihrer genauen Ausprägung nicht in vollem Maße bestimmbar, sie sind unsicher. Somit beziehen sich beide Fachgebiete auf die Zukunft und die Voraussage eines zukünftigen Ereignisses ist mit Unsicherheiten behaftet.

Bei der Zeitabhängigkeit tritt die erste Differenz auf. Portfolios beziehen sich auf den zukünftigen Verlauf der Werte, die Werte sind also zeitabhängig. Es ist üblich, den zukünftigen Verlauf mit einer Rendite anzugeben. Die Rendite wird mit dem Verhältnis zeitpunktbezogener Ertrag zu Anschaffungskosten definiert (vgl. Berk & DeMarzo (2007, S. 64)):

$$\text{Rendite} = \frac{\text{Ertrag zum definierten Zeitpunkt}}{\text{Anschaffungskosten}} \quad (3.1)$$

Besitzt ein Portfolio die erwartete Rendite von zehn Prozent in genau einem Jahr vom jetzigen Zeitpunkt aus gemessen, so ist der Erwartungswert eine zeitabhängige Funktion, die im einfachsten Fall als lineare Funktion definiert wird. Der lineare Verlauf des Erwartungswerts eines angenommenen Portfolios mit zehn Prozent Rendite in einem Jahr und einem Anfangsgesamtwert von 100,00 € wird in Tabelle 3.2 dargestellt.

Bei der frühen Fabrikplanung bei Unternehmen mit wenigen großen Aufträgen kann hingegen vereinfacht angenommen werden, dass als Gesamtergebnis nach Inkludierung der Finanzkalkulationswerte für den Zeitraum der Produktion ein Gesamtkostenblock ermittelt wird, wie in Tabelle 3.3 ersichtlich ist.

Hierbei wird eine eventuelle Kostenentwicklung aufgrund von Produktionsoptimierungen, kontinuierlichen Verbesserungen etc. gemittelt berücksichtigt. Das Gesamtergebnis kann

Jahr	Monat	Portfoliowert
2014	Jänner	100,00 €
2014	Februar	100,83 €
2014	März	101,67 €
2014	April	102,50 €
2014	Mai	103,33 €
2014	Juni	104,17 €
2014	Juli	105,00 €
2014	August	105,83 €
2014	September	106,67 €
2014	Oktober	107,50 €
2014	November	108,33 €
2014	Dezember	109,17 €
2015	Jänner	110,00 €

Tab. 3.2: Beispielhafter linearer Erwartungswertverlauf eines Portfolios mit Wert von 100,00 € und einer erwarteten Rendite von zehn Prozent in einem Jahr von Jänner 2014 bis Jänner 2015.

Jahr	Monat	Gesamtergebnis
2014	Februar bis Mai	1000,00 €

Tab. 3.3: Das beispielhafte Gesamtergebnis der Fabrikplanung, das für ein bestimmtes Produkt für den Produktionszeitraum Februar 2014 bis Mai 2014 gültig ist.

dann über die prognostizierte Stückzahl n auf die Kosten pro Stück heruntergebrochen werden:

$$\text{Kosten pro Stück} = \frac{\text{Gesamtergebnis}}{\text{prognostizierte Stückzahl } n} \quad (3.2)$$

Die Fabrikplanung betrachtet mit der Planung eines spezifischen Produktes nur einen bestimmten Zeitpunkt beziehungsweise Zeitabschnitt in der Zukunft, in dem die Umsetzung stattfinden wird. Es besteht somit keine Notwendigkeit, zeitabhängige Verläufe der Werte zu beschreiben. Lediglich die Einzelwerte müssen genau zu dem geplanten Zeitabschnitt bekannt sein.

Die Unsicherheiten der Finanzinstrumente besitzen untereinander Abhängigkeiten. Diese können von negativer oder positiver Ausprägung sein. Bei positiver Ausprägung der Abhängigkeit von zwei Finanzinstrumenten bewegen sich beide tendenziell in die gleiche Richtung. Der Wert beider Finanzinstrumente nimmt folglich tendenziell gemeinsam zu oder ab. Negative Abhängigkeit beschreibt ein gegenläufiges Verhalten. Entwickelt sich ein Finanzinstrument positiv, nimmt das zweite tendenziell ab und umgekehrt. Bei den Dimensionierungsgrößen der Fabrikplanung können ebenfalls Abhängigkeiten festgestellt werden. Einzelne Dimensionierungsgrößen besitzen die Tendenz, bei Änderungen der Planungsprämissen entweder in die gleiche Richtung oder gegenläufig zu reagieren.

Die Portfolio-Theorie nach Markowitz stellt dem Portfoliomanager eine Methodik zur Modellierung der Unsicherheiten zur Verfügung. Generell werden die Abhängigkeiten linear modelliert, sie korrelieren also. Die Annahme der Korrelation ist eine Grundvoraussetzung für die Methodik der Portfolio-Theorie. Für die Übertragung dieser Methodik in den Bereich der Fabrikplanung ist auch dort die Annahme zu treffen, dass die Dimensionsgrößen korrelieren.

Bei Finanzinstrumenten sind umfangreiche Aufzeichnungen der Wertentwicklung in der Vergangenheit vorhanden. Auf Basis dieser vergangenen Daten wird der Verlauf des Erwartungswertes, das Maß für die Volatilität, die Standardabweichung und die Korrelation aller im Portfolio enthaltenen Finanzinstrumente zueinander ermittelt. Bei der Fabrikplanung wird für jede Planung der Erwartungswert jeder Dimensionierungsgröße aufgrund der Planungstätigkeit neu ermittelt. Vergangene Daten werden zwar als Referenzwerte verwendet, jedoch basiert die Auslegung hauptsächlich auf menschlichem Einfluss. Mittels Detailanalysen der Unsicherheitsarten auf unterer Planungsebene können die Unsicherheitsbereiche klar abgegrenzt werden. Die Möglichkeit der Ermittlung der Korrelation weicht jedoch deutlich von der Portfolio-Theorie ab. Es fehlen die umfangreichen Daten der Vergangenheit, mit denen beispielsweise mittels der Korrelationsanalyse (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 143 ff.)) die Zusammenhänge quantifiziert werden. Obwohl in vielen Produktionsstätten Daten aus der Vergangenheit vorhanden sind, fehlen für dasselbe Projekt Daten von unterschiedlichen Umsetzungen. Hierfür werden laborartige Be-

dingungen mit immer gleichen Anfangszuständen benötigt, um vergleichbare Datensätze zu generieren. In der Praxis werden Projekte selten mehrmals unter ähnlichen Randbedingungen umgesetzt, wodurch vergleichbare Daten generiert werden. Vielfach wird die Umsetzung von Fabrikplanungen als Projekt bezeichnet, wobei die Einmaligkeit des Vorhabens als ein typisches Merkmal für Projekte gilt (vgl. Grundig (2013, S. 217) und Kuster et al. (2011, S. 5)). Anders als bei Finanzinstrumenten kann jedoch auf das explizite sowie implizite Know-how der einzelnen Planer zugegriffen werden, um die Abhängigkeiten zu modellieren. Bei jeder Planung wird genau über diese Abhängigkeiten in Abstimmungsrunden diskutiert. Eine Methodik zur Modellierung des expliziten und impliziten Wissens über die Abhängigkeiten von Fabrikplanungen fehlt laut Analyse des derzeitigen Stands der Technik und wird in weiterer Folge vorgestellt. Man kann dieses vorhandene Wissen jedoch als Vorteil hinsichtlich der Fabrikplanung verstehen. Es werden keine vergangenen Werte und deren Abhängigkeiten in der Vergangenheit in die Zukunft projiziert, sondern die Modellierung basiert auf den aktuellen Werten und den für den spezifischen Fall definierten Abhängigkeiten. Über die Modelle kann in weiterer Folge eine Datenbasis für die Abhängigkeitsanalyse mittels Simulation verschiedener Umsetzungsmöglichkeiten erzeugt werden.

Portfolios von Finanzinstrumenten bieten den Vorteil, dass ihre Inhalte sowie die Menge der Inhalte beliebig verändert werden können. Im Zuge der Quantifizierung der Unsicherheiten der Finanzinstrumente kann ein Gesamtrisiko ermittelt werden und durch Anpassung der Menge beziehungsweise Hinzufügung und Entfernung von spezifischen Finanzinstrumenten ist es möglich, das Gesamtrisiko zu steuern. Bei Fabrikplanungen hingegen treten vielfältige Einschränkungen auf, die eine Variabilität der Inhalte nur begrenzt zulassen. Fabrikplanungen zielen grundsätzlich darauf ab, Pläne für die Produktion von definierten Produkten unter Einsatz von Ressourcen zu erarbeiten. Diese Produktion gibt Randbedingungen an den Planer vor, die die Wahlmöglichkeiten bei der Dimensionierung einschränken. Gleichzeitig finden Rahmenbedingungen wie gesetzliche Bestimmungen, Kundenprämissen oder interne Regelungen Anwendungen, die den Planungsraum zusätzlich einengen. Durch die Quantifizierung von Unsicherheiten soll es möglich sein, bei dem Vergleich verschiedener Planungsalternativen die zugrundeliegenden Risiken mitberücksichtigen zu können.

Abschließend werden die Gemeinsamkeiten und Unterschiede in übersichtlicher Form in Tabelle 3.4 dargestellt.

Die einzelnen Finanzinstrumente des Portfolios verhalten sich also wie die einzelnen Dimensionierungsgrößen der Fabrikplanung: Sie werden zu einem Überblickswert aggregiert und sind jeweils mit Unsicherheiten behaftet. Die Fabrikplanungswerte beziehen sich jedoch nur auf einen bestimmten Zeitabschnitt.

Gegenstand	Portfolios von Finanzinstrumenten	Fabrikplanungen
Generelle Unsicherheit bzgl. Zukunft	vorhanden	vorhanden
Endliche Anzahl an Einzelwerten	vorhanden	vorhanden
Unsicherheit der Einzelwerte	vorhanden	vorhanden
Zeitabhängigkeit der Einzelwerte	zeitabhängiger Einzelwertverlauf	Gültigkeit der Einzelwerte auf bestimmten Planungszeitraum der Umsetzung eingeschränkt
Aggregation eines Übersichtswertes	sinnvoll	sinnvoll
Abhängigkeit der Einzelwerte	vorhanden	vorhanden
Modellierung der Unsicherheiten	zielführend, beispielsweise mittels Portfolio-Theorie	Gegenstand der Untersuchung
Datenbasis für Modellierung der zukünftigen Unsicherheiten	Umfangreiche Datenbasis über Verhalten der Einzelwerte in der Vergangenheit	Experten-Know-how bzgl. Dimensionierung der Fabrik für den aktuellen Anwendungsfall
Modellierung der Abhängigkeiten	zielführend, beispielsweise mittels Portfolio-Theorie	Gegenstand der Untersuchung
Datenbasis für Modellierung der Abhängigkeiten	Umfangreiche Datenbasis über Abhängigkeit der Einzelwerte in der Vergangenheit	Gegenstand der Untersuchung
Linearisierung der Abhängigkeiten	zielführend, beispielsweise mittels Portfolio-Theorie	Gegenstand der Untersuchung
Methodik zur Analyse der Unsicherheiten	vorhanden, beispielsweise Portfolio-Theorie	Gegenstand der Untersuchung
Möglichkeiten zur Steuerung der Unsicherheiten	Unsicherheiten steuerbar über beliebige Austauschbarkeit der Inhalte der Portfolios	Unsicherheiten begrenzt steuerbar über eingeschränkte Änderungen der Dimensionierungen von Fabriken

Tab. 3.4: Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Portfolios und Fabrikplanungen im Hinblick auf Unsicherheiten

3.4.2 Mathematisches Modell der Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die Gemeinsamkeiten hinsichtlich der Unsicherheiten zwischen frühen Fabrikplanungen und Portfolios von Finanzinstrumenten motivieren zu analysieren, wie eine ausgereifte Methodik der Finanzmathematik, die Portfolio-Theorie nach Markowitz, in die Fabrikplanung übertragen und integriert werden kann. Es gilt zu untersuchen, welche Teile der Methodik direkt übertragen werden können und wo Bedarf besteht, neue Vorgehensweisen zu erarbeiten. Die Inhalte von Tabelle 3.4 geben hierfür einen ersten Richtwert.

Im ersten Schritt wird das mathematische Modell für die Quantifizierung der Unsicherheiten betrachtet. Bei der Modellerstellung wird dabei auf die drei Merkmale eines Modells Abbildungsmerkmal, Verkürzungsmerkmal und pragmatisches Merkmal nach Stachowiak (1973, S. 128 ff.) zurückgegriffen. Nachdem dieses Modell speziell für die frühe Phase mit einer Begrenzung von Zeit und Ressourcen bei der Planung entwickelt wird, ist es das Ziel, dieses Modell möglichst einfach zu generieren, wobei die grundlegenden Beziehungen Berücksichtigung finden.

Annahmen im mathematischen Modell für die frühe Fabrikplanung

Als notwendige Voraussetzung für die Anwendung der Portfolio-Theorie in der Fabrikplanung muss für jede einzelne Dimensionierungsgröße ein Erwartungswert angegeben werden. Gleichzeitig wird die Annahme getroffen, dass die Dimensionierungsgröße normalverteilt um den angegebenen Erwartungswert streut. Die Annahme der Normalverteilung der Einzelwerte ist eine Grundvoraussetzung für die Anwendung der Theorie. Somit ist für jeden Einzelwert ein Erwartungswert mit entsprechender Standardabweichung zu definieren.

Eine Normalverteilung ist eine von vielen Möglichkeiten, Verteilungen zu beschreiben. Mit einer entsprechenden Anzahl von Daten kann aus der Menge der Verteilungen die am besten passende ausgewählt werden. In der Literatur existieren entsprechende Vorgehensweisen, um die Verteilungsfunktion zu ermitteln und dann zu überprüfen, inwieweit die Stichprobenwerte durch die eruierte Verteilung der Grundgesamtheit erfüllt werden (vgl. unter anderen Kreyszig (1979) und Pruscha (2006)). Bei der Fabrikplanung muss davon ausgegangen werden, dass nicht genügend Daten vorhanden sind, die eine Ermittlung der Verteilungsfunktion und damit eine statistische Kalibrierung ermöglichen. Für einen Datenpool von verschiedenen Umsetzungen mit den entsprechenden Abweichungen zueinander müsste die Produktion entsprechend oft mit immer gleichen Anfangsbedingungen umgesetzt werden, was in Realität als sehr unwahrscheinlich betrachtet werden kann. Für die Ermittlung der Verteilungsfunktion ist jedoch eine Mindestanzahl

an Daten notwendig, um den Effekt des Einflusses der einzelnen Stichprobenwerte auf die Verteilung reduzieren zu können (vgl. Kreyszig (1999, S. 1105)).

Wenn nur wenige Daten oder nur Expertenschätzungen für die Beschreibung der Unsicherheiten vorhanden sind, ist es zielführend, die Verteilung nur mit dem Erwartungswert und der Varianz zu spezifizieren (vgl. Lurie et al. (1993, S. 2)). Mit diesen beiden Werten ist eine Normalverteilung vollständig bestimmt. Der Theorie zufolge stellt die Normalverteilung die wichtigste stetige Verteilung dar, die in einer Vielzahl von statistischen Anwendungen, beispielsweise in der Wirtschaft, Psychologie und Astronomie, nachgewiesen werden kann (vgl. Kreyszig (1999, S. 1085) und Markowitz (1959, S. 17)). Die Normalverteilung wurde vielfach untersucht und beinhaltet ein großes Spektrum an mathematischen Operationen (vgl. unter anderen Kreyszig (1999), Bronstein et al. (2000) und Hartung & Elpelt (2007)). Bei der Betrachtung der Ergebnisse der in dieser Arbeit entwickelten Methodik ist stets zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse unter Annahme der Normalverteilung erreicht wurden. Um während der Fabrikplanung künftig Unsicherheiten mit betrachten zu können, besteht die Notwendigkeit, dass der Planer neben dem wahrscheinlichsten Wert der drei Dimensionierungsgrößen auch einen Bereich für die Verteilungsfunktion definiert. Über die vorab getroffene Definition des Bereichs kann die Standardabweichung für die Normalverteilung errechnet werden.

Die Annahme der Normalverteilung impliziert, dass die Werte symmetrisch um den wahrscheinlichsten Wert, dem sogenannten Erwartungswert, streuen. Die Symmetrieeigenschaft der Normalverteilung stellt eine weitere Annahme dar. Gerade in der frühen Fabrikplanung fehlt dem Planer ein fundierter Datensatz, um die Unsicherheiten genau zu spezifizieren. Die einfachste Form einer Verteilung wird mit einer Gleichverteilung zwischen einer unteren und oberen Grenze definiert (vgl. Koonce et al. (2006, S. 47)). Für die Ermittlung dieser Grenzen sind bei jeder Planung verschiedene Szenarien mit geeigneten Methoden zu betrachten und somit die Grenzen zu definieren (vgl. Grundig (2013, S. 14)). In Planungstätigkeiten mit geringem Zeitraum besteht auch die Möglichkeit, dass sich der Planer nur auf den wahrscheinlichsten Fall konzentriert. Gerade der Planer als Experte besitzt das implizite Wissen, welche Detailunsicherheiten sich hinter jeder Dimensionierungsgröße verbergen. Mit der Einführung von zwei Parametern je Dimensionierungsgröße, nämlich des Bereichs und des Erwartungswertes, besitzt der Planer die Möglichkeit, die Information über die Unsicherheiten zu quantifizieren und in die Berechnung einfließen zu lassen. Mit dem Legen von Normalverteilungen als Kurven innerhalb der Grenzen können die Planungswerte in ein System der abhängigen Aggregation übertragen werden.

Eine weitere Begründung für die Annahme der Normalverteilung liefert auch der zentrale Grenzwertsatz der mathematischen Statistik. Dieser besagt (vgl. beispielsweise Deutsch (2008, S. 640)): „Die Summe einer großen Anzahl voneinander unabhängiger Zufallszahlen, von denen jede zur Summe nur einen unbedeutenden Beitrag liefert, ist annähernd

normalverteilt, egal, welcher Verteilung die einzelnen Zufallszahlen gehorchen.“ Bei der Fabrikplanung besteht der gesamte Dimensionierungsbedarf aus dem jeweiligen Dimensionierungsbedarf der beteiligten Gewerke, der sich in die drei Größen Betriebsmittel, Personal und Flächen gliedert. Diese drei Größen bestehen wiederum aus einer Vielzahl von Einzelpositionen, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Für diese Detailunsicherheiten wird die Annahme getroffen, dass sie unabhängig voneinander sind sowie keine der Positionen einen zu großen Einfluss auf das Gesamtergebnis besitzt. Aus diesem Grund ist es möglich, schon auf der Ebene der drei Dimensionierungsgrößen je Gewerk die Annahme der Normalverteilung zu treffen. In Kapitel 5.2.3 wird im Zuge der Verifikation die Annahme der Normalverteilung auf Basis von Beispieldaten diskutiert, wobei ein spezifischer Beweis der Normalverteilung aufgrund des Fehlens der Informationen über die Verteilungen der Einzelpositionen in dieser Arbeit nicht durchgeführt werden kann und weiterführende Forschungsaktivitäten angeregt werden.

Bei der Dimensionierung für künftige Projekte kann es zu Stückzahlschwankungen oder Produktveränderungen kommen, die einen Einfluss auf die Dimensionierungsgrößen haben. In dieser Arbeit wird jedoch ein Mittelwert für die Dimensionierungsgrößen über den Produktionszeitraum gelegt und somit ein statischer Ansatz gewählt (vgl. Grundig (2013, S. 88)). Dies stellt eine Vereinfachung dar, aber im Hinblick auf den Fokus von Unternehmen mit wenigen Produkten, die langfristig produziert werden und die dementsprechend wenige große, dafür langfristige Verträge zur Abnahme der Produkte besitzen (vgl. Buch et al. (2011, S. 3002)), führt diese Annahme zu einer geringen Abweichung der Realität. Zusätzlich wird auch angenommen, dass sich die Unsicherheiten im Laufe der Produktionsperiode nicht verändern, sie werden ebenfalls gemittelt. Der Erwartungswert und die definierten Bereiche der Abweichungen sind somit in diesem Modell zeitunabhängig abgebildet.

Der Planer mit seinem Know-how bezüglich seines spezifischen Prozesses besitzt das größtmögliche Wissen über die Unsicherheiten, die in seinen Planungen vorhanden sind. Es wird angenommen, dass er diese Unsicherheiten in der aggregierten Ebene der Betriebsmittel, des Personals und der Flächen übergreifend quantifizieren kann (vgl. Abbildung 3.7). In dieser Methodik nimmt der Planer also eine aktive Rolle ein und nützt diese, um seine Unsicherheiten als Risiken zu dokumentieren und im Unternehmen bekannt zu geben. Erst mit dem gemeinschaftlichen Wissen über alle Risiken können Risikostrategien entwickelt und umgesetzt werden. Die vier Elementarstrategien bestehen aus der Strategie zur Akzeptanz, zur Vermeidung, zur Minimierung und Transferierung von Risiken (vgl. Schuh et al. (2008, S. 69)). Auch wenn dem Planer die Unsicherheiten auf der untersten Detaillierungsebene bekannt sind, werden aufgrund der Anforderung der einfachen Anwendbarkeit der Methodik die Unsicherheiten auf einer aggregierten Ebene quantifiziert. Da Abhängigkeiten nur auf der Ebene der Quantifizierung berücksichtigt werden, werden die Detailabhängigkeiten der einzelnen Dimensionierungsgrößen vernachlässigt.

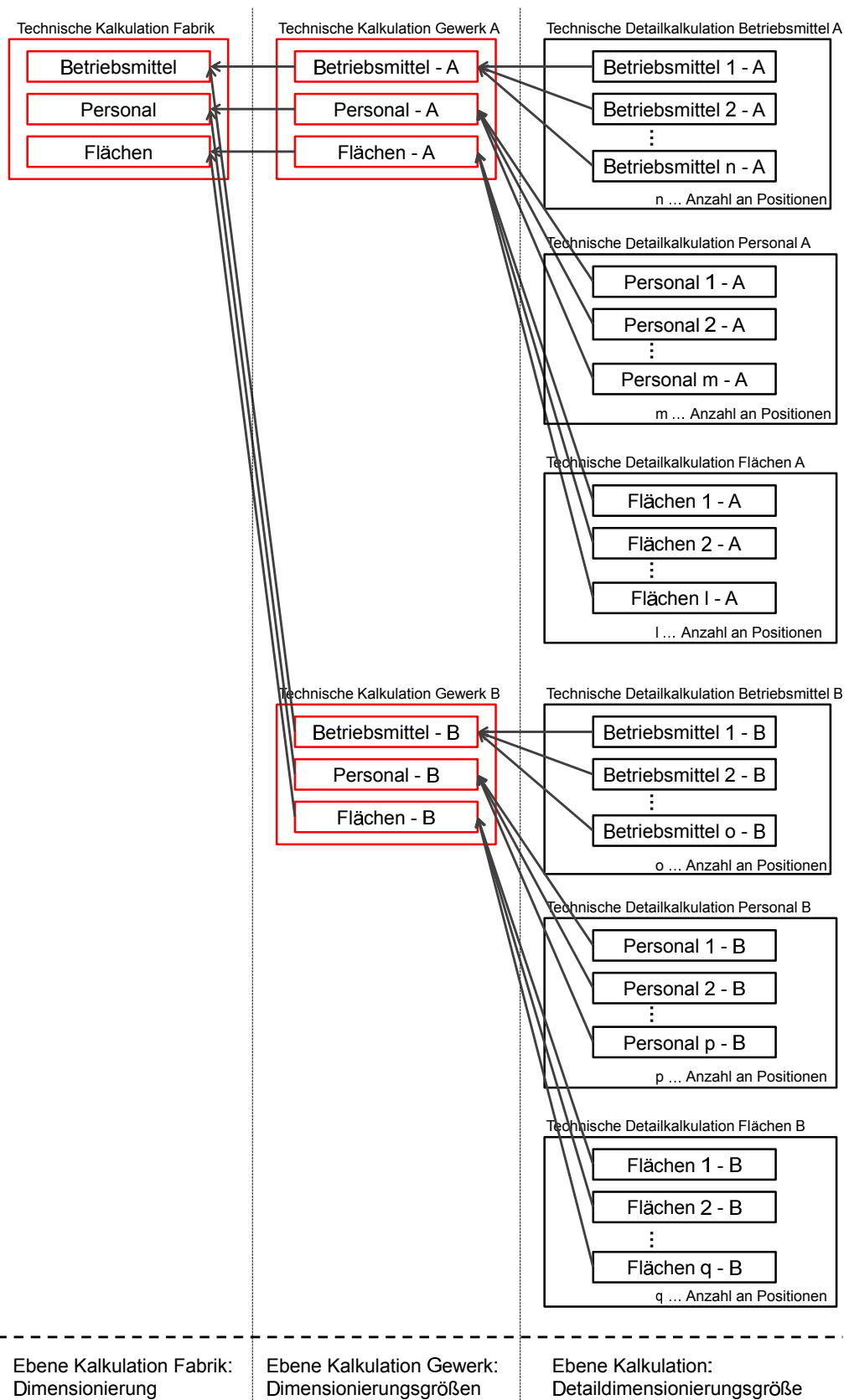


Abb. 3.7: Schematische Darstellung der Planungsebenen in der Fabrikplanung (beispielhaft mit zwei Gewerken A und B veranschaulicht)

Bereich	Annahme und Vereinfachungen
Unsicherheiten	Quantifizierung mit Normalverteilung
Ebene der Quantifizierung	aggregierte Ebene der drei Dimensionierungsgrößen (Betriebsmittel, Flächen und Personal) je Gewerk
Ebene der Abhängigkeitsmodellierung	aggregierte Ebene der drei Dimensionierungsgrößen je Gewerk
Erwartungswert der Normalverteilungen	zeitunabhängig, statisch
Standardabweichung der Normalverteilungen	zeitunabhängig, statisch
Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen voneinander	linear, zeitunabhängig, statisch

Tab. 3.5: Überblick über die Annahmen und Vereinfachungen im mathematischen Modell für die frühe Fabrikplanung

Die einzelnen Dimensionierungsgrößen können ein Verhalten auf Änderungen von äußeren Einflüssen, wie beispielsweise der Produktdaten oder des Gesamtstückzahlverlaufs, aufweisen, das sich mit einer gewissen Abhängigkeit voneinander beschreiben lässt. Wird als Kalkulationsgrundlage beispielsweise die Gesamtstückzahl erhöht, kommt es zu einem erhöhten Bedarf an Robotern, die das Produkt fertigen. Dadurch erhöht sich infolgedessen auch der Bedarf an Produktionsflächen, die den notwendigen Platz und das Fundament für die Roboter bieten. Im mathematischen Modell werden diese Abhängigkeiten in Bezug auf die Aggregation der Unsicherheiten linear abgebildet, sie korrelieren. Zusätzlich findet eine mögliche zeitliche Veränderbarkeit der Abhängigkeiten in diesem Modell keine Anwendung. Auf der Ebene Gewerke werden die einzelnen Dimensionierungsgrößen aggregiert, siehe hierzu Abbildung 3.7. Hier ist es erforderlich, die Korrelationen jeder Größe mit jeder anderen zu erheben. Einzelne Reaktionen wie nicht-lineare Sprünge finden im Modell jedoch keine Berücksichtigung. Die beschriebenen Abhängigkeiten haben nur Einfluss auf die Aggregation der Unsicherheiten und nicht auf die Erwartungswerte. Die Erwartungswerte werden dem Modell als Inputdaten zur Verfügung gestellt und es obliegt dem Planer, in welcher Form er in seinem Detailmodell die Abhängigkeiten der Erwartungswerte für Szenarienbetrachtungen berücksichtigt.

In Tabelle 3.5 werden die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen in einem Überblick dargestellt.

Ermittlung des Einsatzbereichs des mathematischen Modells

Wird eine Produktion für ein neues Produkt in einer frühen Planungsphase dimensioniert, so liefern die Planer für jedes beteiligte Gewerk als Output den Bedarf für das benötigte

Personal, die benötigten Flächen und die benötigten Betriebsmittel. Dieser Bedarf wird mit dem Output der kaufmännischen Kalkulation ergänzt, die jede Größe mit dem Umrechnungsfaktor in eine gemeinsame Währung überträgt. Erst jetzt können die Gesamtkosten in einer Zahl ausgedrückt werden. Als Input für das mathematische Modell sind also sowohl die Kalkulationen der Gewerke als auch der Finanz notwendig. Den Gewerken wird zusätzlich noch die Möglichkeit gegeben, für jede Dimensionierungsgröße auf aggregierter Ebene die in der Planung vorhandenen Unsicherheiten mit Schätzungen, basierend auf dem implizit vorhandenen Wissen, zu quantifizieren. Mit diesen Informationen ist das letzte große Inputpaket definiert. Betrachtet man nun das dahinterliegende mathematische Modell als Black-Box, so ermittelt diese als zusätzlichen Output zu den Gesamt- und den Detailkosten das Gesamtrisiko und die Detailrisiken, wie in Abbildung 3.8 dargestellt wird. Mit diesem Output wird die Grundlage für eine umfassende Kosten- und Risikoanalyse geschaffen. Ausgehend von den Gesamtkosten und dem quantifizierten Gesamtrisiko besteht die Möglichkeit, die Details der Kosten und Risiken je Gewerk, je Dimensionierungsgröße oder je Detailwert spezifisch zu betrachten.

Aggregation der erwarteten Gesamtkosten

Der Erwartungswert der Summe der Einzelkosten $E(GK)$ entspricht der Summe der Erwartungswerte der Einzelkosten $E(EK_n)$ analog zum Erwartungswert der Summe der Finanzinstrumente (siehe Gleichung 2.27):

$$E(GK) = E\left(\sum_n EK_n\right) = \sum_n E(EK_n) \quad (3.3)$$

Mit dieser Formel können nun die Erwartungswerte der Summe der Einzelkosten sowie beliebiger Teilsummen von spezifischen Einzelkosten gebildet werden. Es besteht die Möglichkeit einer Aggregation von Teilsummen je nach Bedarf. Diese Teilsummen können dann wieder in eine höhere Ebene aggregiert werden. Eine wesentliche Anforderung an das mathematische Modell wird mit der Aggregationsmöglichkeit in den verschiedensten Ebenen und Sichten erfüllt.

Quantifizierung der Unsicherheiten je Dimensionierungsgröße

Generell lässt die Methodik dem Anwender offen, auf welcher Aggregationsebene der Dimensionierung der Fabrik die Unsicherheiten modelliert werden. Grundsätzlich ist diese Methode in Beziehung auf den Detaillierungsgrad beliebig anwendbar, wobei die Beherrschbarkeit in der Anwendung sowie die Möglichkeiten zum Erkenntnisgewinn die Auswahl der Anwendungsebene entscheiden (vgl. Semmler (2001, S. 451)). Im Zuge der

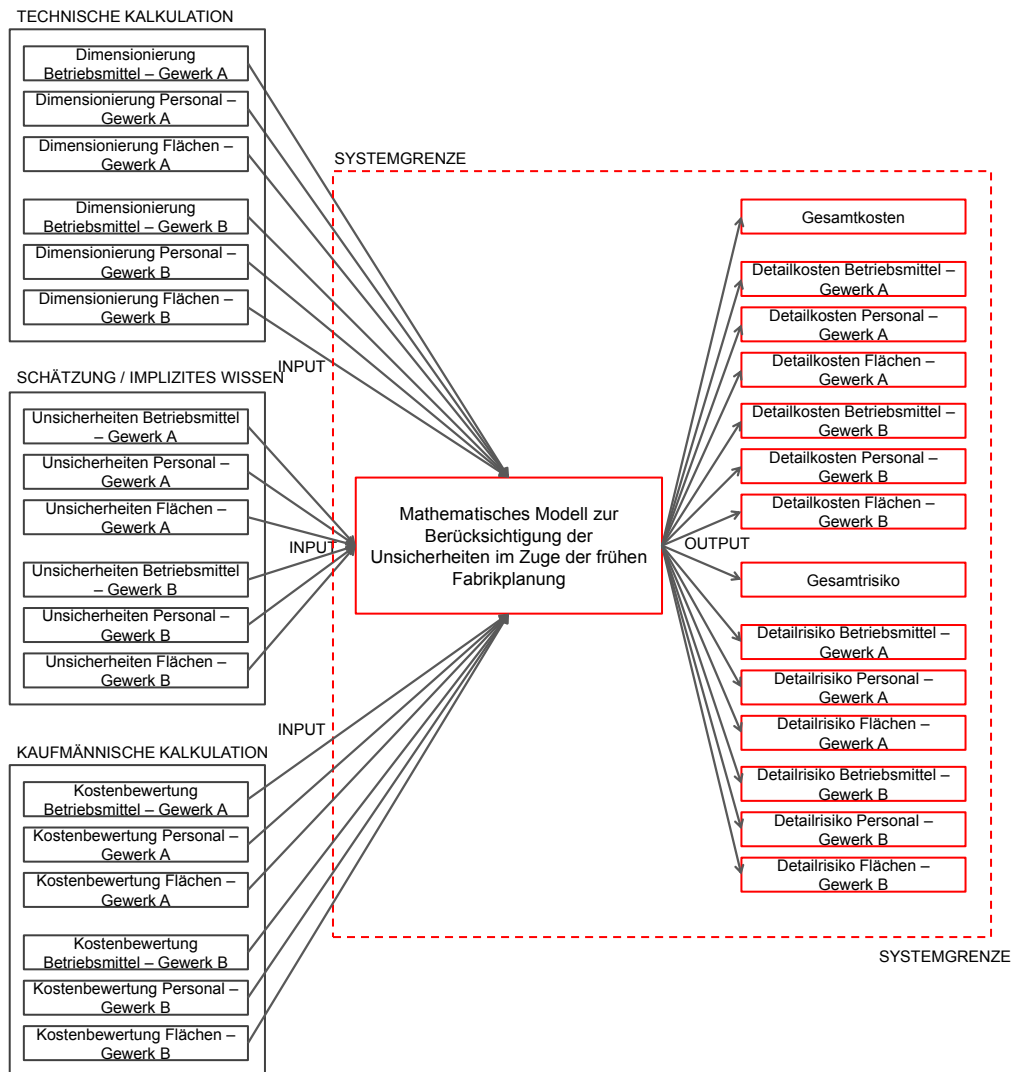


Abb. 3.8: Systematische Darstellung der Input- und Outputdaten des mathematischen Modells zur Berücksichtigung der Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung (beispielhaft mit zwei Gewerken A und B veranschaulicht)

nachfolgenden Beschreibung wird die Schnittstelle zwischen dem Planer und dem mathematischen Modell in der Aggregationsebene „Kalkulation Gewerk“ (siehe Abbildung 3.7) gewählt. Diese Ebene bietet einen überschaubaren Aufwand für den Planer, für jeden Wert zusätzlich die Unsicherheiten zu quantifizieren. Auf dieser Ebene existieren für jedes Gewerk die aggregierten Werte der Betriebsmittel, des Personals und der Flächen, wobei diese Werte als Input in das mathematische Modell dienen. Mit Rücksicht auf die einfache Anwendbarkeit besteht die Notwendigkeit, die Unsicherheiten mit geringstmöglichem Aufwand anzugeben.

Aufgrund der Symmetrieeigenschaft ist die Normalverteilung durch Angabe von Erwartungswert und Standardabweichung σ vollständig definiert. Der Erwartungswert der Dimensionierungsgrößen $E(Dim_i)$, also der wahrscheinlichste Wert, wird an dieser Stelle dem Wert je Gewerk gleichgesetzt. Dies stellt eine gewählte Definition in diesem Modell dar, das dem Planer bewusst sein muss. Dadurch wird definiert, dass die ermittelten Dimensionierungsgrößen die wahrscheinlichsten Werte spezifizieren und der Bedarf mit 50-prozentiger Wahrscheinlichkeit über oder unter den Erwartungswerten liegt. Für die Definition der Standardabweichung stehen verschiedene Möglichkeiten offen. Eine einfache Möglichkeit stellt die Angabe des Bereichs in Prozent p_{Dim_i} des definierten Erwartungswertes je Dimensionierungsgröße Dim_i dar (vgl. Touran (1993, S. 64)). Das Verhältnis der Standardabweichung zum Erwartungswert wird als Variationskoeffizient v bezeichnet (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 47)).

$$v = \frac{\sigma}{E(X)} \quad (3.4)$$

In einem solchen Fall wird die Eingabe des Planers je Dimensionierungsgröße auf die zwei Werte Erwartungswert und Bereich der Streuung in Prozent begrenzt. Für den Bereich kann zur einfachen Handhabung definiert werden, dass die angegebene Prozentzahl den Abstand zur oberen und unteren Grenze darstellt, worin 95,5 Prozent der auftretenden Fälle liegen. Im Falle einer Normalverteilung entsprechen rund 95,5 Prozent einem Bereich zwischen -2σ und $+2\sigma$ (vgl. Kreyszig (1979, S. 128 f.)).

$$p_{Dim_i} E(Dim_i) := 2\sigma_{Dim_i} \quad (3.5)$$

$$p_{Dim_i} = \frac{2\sigma_{Dim_i}}{E(Dim_i)} = 2v_{Dim_i} \quad (3.6)$$

An dieser Stelle wird die Annahme getroffen, dass der Planer das Wissen und die Fähigkeit besitzt, auf der definierten Aggregationsebene die Unsicherheiten seiner Dimensionierungstätigkeit mit einer Schätzung zu quantifizieren. Durch diese Quantifizierung wird das mathematische Modell der Unsicherheiten an jeden spezifischen

Größe [Input bzw. Formel]	Wert	Einheit
Erwartungswert $E(Dim_{Fläche})$ von der Flächendimensionierung von Gewerk A [Input]	50	m ²
Prozent p_{Dim_i} vom Erwartungswert $E(Dim_{Fläche})$ [Input]	10	%
Variationskoeffizient v_{Dim_i} [$v_{Dim_i} = p_{Dim_i}/2$]	5	%
Abstand zwischen Erwartungswert $E(Dim_{Fläche})$ und oberer/unterer Grenze [$2\sigma_{Dim_{Fläche}} = p_{Dim_{Fläche}} E(Dim_{Fläche})$]	5	m ²
Standardabweichung $\sigma_{Dim_{Fläche}}$ [$\sigma_{Dim_{Fläche}} = p_{Dim_{Fläche}} E(Dim_{Fläche})/2$]	2,5	m ²
Untere Grenze UG für den symmetrischen Bereich von rund 95,5 % der auftretenden Fälle [$UG = E(Dim_{Fläche}) - 2\sigma$]	45	m ²
Obere Grenze OG für den symmetrischen Bereich von rund 95,5 % der auftretenden Fälle [$OG = E(Dim_{Fläche}) + 2\sigma$]	55	m ²

Tab. 3.6: Quantifizierung von Unsicherheiten mit Normalverteilungen am Beispiel der Dimensionierungsgröße Fläche vom allgemeinen Gewerk A

Anwendungsfall, also an jede frühe Fabrikplanung, angepasst. Um die Schätzung für den Planer möglichst einfach anwendbar zu gestalten, wird die Eingabemöglichkeit mit einem einzigen Parameter zusätzlich zur Dimensionierungsgröße begrenzt.

Neben der Möglichkeit der Schätzung des Bereichs der Normalverteilung existiert auch die statistische Kalibrierung des Modells mit historischen Daten. Aufgrund der in Kapitel 3.4 diskutierten oftmals unzureichenden Qualität und Quantität der vorhandenen Daten ist der Einsatz der statistischen Kalibrierung in diesem Zusammenhang von geringer Erfolgswahrscheinlichkeit.

Ebenso besteht die Möglichkeit, dass die Planer bevorzugen, gleich direkt den Mittelwert und die Varianz zu spezifizieren (vgl. Touran (1993, S. 64)). In diesem Fall kann sofort mit den eingegeben Werten weitergerechnet werden und die Gleichung 3.5 entfällt.

In der nachfolgenden Tabelle 3.6 wird die Eingabe des Planers für eine beispielhafte Dimensionierungsgröße und der quantifizierte Unsicherheitsbereich dargestellt. Im Beispiel wird der Dimensionierungoutput für die Fläche im fiktiven Gewerk A mit 50 m² beziffert. Der Planer definiert den Bereich der Unsicherheiten, in dem der Bedarf mit 95,5-prozentiger Wahrscheinlichkeit liegen wird, mit zehn Prozent. Dies ergibt in diesem Beispiel einen Bereich von $|2\sigma_{Dim_{Fläche}}|$ von Plus/Minus 5 m². Das bedeutet, dass der tatsächlichen Bedarf laut Planer mit 95,5-prozentiger Wahrscheinlichkeit im Bereich von 45 m² und 55 m² liegen wird und der wahrscheinlichste Wert mit 50 m² definiert ist. In Abbildung 3.9 wird das Risiko der Flächendimensionierung anhand der Dichtefunktion der Normalverteilung dargestellt und der spezifizierte $|2\sigma_{Dim_{Fläche}}|$ -Bereich hervorgehoben.

In Planungstätigkeiten ohne Unsicherheitsmodellierung gibt der Planer die Dimensionierungsgrößen als Wert an. In der Methodik zur Berücksichtigung der Unsicherheiten wird

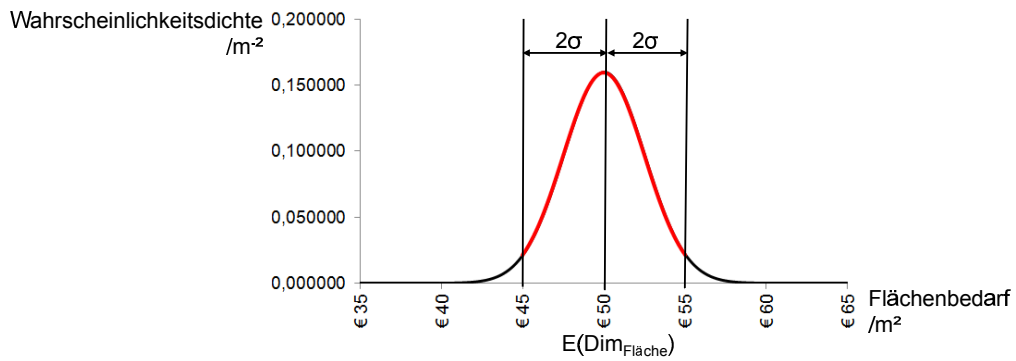


Abb. 3.9: Darstellung der Dichtefunktion der Normalverteilung am Beispiel der Dimensionierungsgröße Fläche (mit dem Erwartungswert $E(Dim_{Fläche})=50 \text{ m}^2$ und einer Standardabweichung $\sigma=2,5 \text{ m}^2$)

vom Planer gefordert, den Bereich der Standardabweichung als einen einzigen Wert zusätzlich zum Wert der Dimensionierungsgröße anzugeben. Dadurch wird eine einfache Anwendbarkeit unterstützt.

Ermittlung von Korrelationen der Dimensionierungsgrößen

Die zentrale Funktionalität im mathematischen Modell stellt die Berücksichtigung der Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen dar. Diese Abhängigkeiten werden vereinfacht linearisiert in Form von Korrelationen abgebildet. Die Ermittlung der Größe der Korrelationen stellt eine besondere Herausforderung dar, wenn ungenügend Daten aus der Vergangenheit vorhanden sind, um Abhängigkeiten und Zusammenhänge in Form der statistischen Kalibrierung zu quantifizieren (vgl. Schwaiger (2013, S. 219) und Bakhshi & Touran (2012, S. 135) und Touran & Wisser (1992, S. 260)). Für den Fall von ausreichendem statistischem Datenmaterial stehen in der multivariaten Statistik Werkzeuge wie die Korrelationsanalyse und Regressionsanalyse zur Verfügung, um die Zusammenhänge zu kalibrieren.

Bei Fabrikplanungen stehen oftmals nicht genügend Daten aus der Vergangenheit zur Verfügung. Die Gründe können zum einen auf eine mangelhafte Dokumentation zurückzuführen sein. Im Falle von vielen, schnell durchgeführten Kalkulationsschleifen im Zuge der frühen Planung kann der eindeutige Bezug der Inputdaten zur Kalkulation verlorengehen. Das Fehlen eines durchgängigen Datenmanagementsystems stellt zum Beispiel eine mögliche Ursache dafür dar. Zum anderen ist ein Abgleich der Planungsdaten mit den realen Daten aus der später stattfindenden Produktion mit hohem Aufwand verbunden, da sich die Produktdaten bis kurz vor Produktionsstart, aber auch noch während der Produktion ändern können. Dies führt zum Unterschied zwischen der Berechnungsgrundlage für die frühe Planungsphase und der Basis für die Produktionsdaten. Die Neu-

planung bereits laufender Produkte ist wirtschaftlich schwierig zu rechtfertigen und die Gegenüberstellung Aufwand zu Nutzen fällt dabei oft negativ aus.

Dennoch besitzt die Fabrikplanung einen maßgeblichen Vorteil gegenüber der Portfolio-Theorie. Während Korrelationen in der Portfolio-Theorie auf der Basis von Daten der Vergangenheit ermittelt werden, kann in der Fabrikplanung das vorhandene Wissen bezüglich des Einflusses der Inputgrößen auf die Dimensionierungsgrößen für eine Korrelationsanalyse verwendet werden. Im Gegensatz zur Portfolio-Theorie steht bei der Fabrikplanung die Abbildung des impliziten Wissens über vorhandene Unsicherheiten im Vordergrund. Mittels des modellierten Experten-Know-how bezüglich Dimensionierung der Fabrik und Abhängigkeit der Dimensionierungsgrößen wird Datenbasis für die Korrelationsanalyse generiert.

Die Planung basiert auf den Inputdaten des jeweiligen zu planenden Produktes, welches sich aus den Produktdaten, Produktionsdaten, getroffenen Prämissen, Richtlinien und Gesetzen zusammensetzt. Jeder Input auf die Planung besitzt Auswirkungen auf den kalkulierten Mengenbedarf. Zwischen Input und Output steht die Planungstätigkeit und das Wissen des Fabrikplaners. Es stehen verschiedene Methoden zur Verfügung, um für Produkte beziehungsweise Projekte den Mengenbedarf und in weiterer Folge die Kosten zu ermitteln. Duverlie & Castelain (1999, S. 895) definierten vier unterschiedliche Methoden der Kostenermittlung. Diese Methoden basieren entweder auf den Erfahrungen des Planers, auf Referenzprodukten beziehungsweise -projekten, auf Parametern, die das Produkt beziehungsweise Projekt größtenteils beschreiben, oder auf einem Herunterbrechen des Herstellungsprozesses auf elementare Tätigkeiten (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 895)). Eine Kombination verschiedener Methoden kann zu einem optimierten Gesamtkonzept je Anwendungsfall führen (vgl. Duverlie & Castelain (1999, S. 905)). Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass Kostenermittlungsmethoden in den Unternehmen vorhanden sind. Dies dient in weiterer Folge als Basis für die Ermittlung der Korrelationen der Dimensionierungsgrößen.

Es werden drei Fälle unterschieden: Im Schritt A wird ein Vorgehen für den Fall beschrieben, dass die Zusammenhänge von Produkt und Kosten nicht explizit vorhanden sind. Schritt B definiert die Ermittlung der Korrelationen auf Basis von im Unternehmen vorhandenen Kostenfunktionen. Schritt A kann also in jedem Unternehmen mithilfe der Fabrikplaner durchgeführt werden, Schritt B bietet eine Möglichkeit, die Korrelationen mit höherer Genauigkeit abzubilden, bedarf aber einer höheren Qualität der Abbildung der Kostenfunktionen. Schritt C muss angewendet werden, wenn im Unternehmen Produkte und Projekte vorhanden sind, bei denen sich mit jedem neuen Produkt beziehungsweise Projekt die Zusammenhänge gänzlich ändern. In diesem Fall kann keine übergreifende vereinfachte oder detaillierte Kostenfunktion angenommen werden. Für alle drei Fälle muss jedoch beachtet werden, dass jedes Modell das pragmatische Merkmal besitzt, Korrelationen in einer spezifischen Fabrik zu ermitteln und die Form der Abstraktion für

dieses Ziel ausgewählt wird.

Ermittlung der Einflussfaktoren der Dimensionierungsgrößen anhand eines relativen Kostenfaktormodells - Schritt A

Sind die Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen und in weiterer Folge die Abhängigkeiten der Kosten von den Inputwerten nicht detailliert modelliert, so existiert in der Literatur eine Schätzmethodik zur Aggregation von mit Verteilungen modellierten Unsicherheiten (vgl. Touran (1993, S. 64)). Die Korrelationskoeffizienten aller Paare von mit Unsicherheiten behafteten Outputwerten werden anhand von sieben Kategorien geschätzt. Man unterscheidet hierbei den Fall keiner Korrelation (Korrelationskoeffizient 0), einer schwachen (Korrelationskoeffizient 0,15), gemäßigten (Korrelationskoeffizient 0,45) und starken Korrelation (Korrelationskoeffizient 0,8). Die schwache, gemäßigte und starke Korrelation kann sowohl von negativer als auch positiver Ausprägung sein. Es wird angenommen, dass ein Experte diese Einschätzung hinsichtlich der Korrelationskategorien treffen kann. Im eigentlichen Sinn stellt dies eine Transformation von qualitativen Daten in quantitative dar, die anhand von Ratingskalen eingeschätzt werden (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 298)). Bei steigender Komplexität ist es für einen Experten schwierig, Korrelationen rein durch Schätzung ermitteln zu können und für diesen Fall kann das Vorgehen laut Schritt A herangezogen werden. Hierfür wird vorausgesetzt, dass der Experte Einflüsse von Inputwerten auf die Detailgrößen in der Dimensionierung schätzen kann. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass die Kostenauswirkungen der Detaildimensionierungsgrößen auf die aggregierten Dimensionierungsgrößen abgeschätzt werden können. Die Schätzungen werden anhand von Ratingskalen als Hilfe zur Quantifizierung durchgeführt. Ziel dieses Kostenfaktormodells ist die Simulation von Angeboten aus der Vergangenheit. Als Ergebnis dienen dabei Punktschätzer für die einzelnen Dimensionierungsgrößen, die in weiterer Folge eine Stichprobe für die Ermittlung der Korrelationskoeffizienten der Gesamtfabrik darstellen.

Bei Schritt A werden somit die Experten jeder Planungsabteilung für die Ermittlung der Korrelationen der Dimensionierungsgrößen miteinbezogen. Es wird eine Matrix aufgestellt, wobei alle Inputwerte allen Outputwerten gegenübergestellt werden. Um den Planern eine bestmögliche Schätzung zu ermöglichen, werden die Schätzungen auf der Ebene der Kalkulation der Detaildimensionierungsgrößen durchgeführt. Diese Ebene befindet sich eine Detaillierungsstufe tiefer als jene, auf der die Korrelationen gebildet werden.

Nachdem Inputwerte in sehr unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorhanden sein können, ist für die Matrix eine Übersicht der wichtigsten Faktoren notwendig. Bei der Erhebung kann zwischen den übergreifenden Werten, die auf alle beteiligten Abteilungen oder Gewerke Einfluss nehmen, und zwischen spezifischen Werten, die nur auf einzelne oder

wenige beteiligte Abteilungen und Gewerke Einfluss nehmen, unterschieden werden. Bei der Ermittlung der Inputwerte ist besondere Rücksicht zu nehmen, welche Werte die Haupteinflüsse auf die Fabrikdimensionierung nehmen. Auf Basis vergangener Projekte und Produkte können diese anhand von Experteninterviews ermittelt werden. Die Anwendung des Pareto-Prinzips (vgl. Kuster et al. (2011, S. 385)) erleichtert die Ermittlung dieser Inputwerte. Man fokussiert hierbei auf die Daten, die 80 Prozent des Gesamtergebnisses beeinflussen und als Hauptinputwerte definiert werden können. Einige Inputwerte beinhalten nicht eindeutig quantifizierbare Informationen, die mit quantifizierbaren ersetzt werden müssen. Als Beispiel wird anstatt der Materialangabe des Produkts die Lackierbarkeit für das Gewerk Lack und Verarbeitbarkeit des Materials für das Gewerk Rohbau definiert und beurteilt.

Eine Kompromisslösung zwischen Detaillierungstiefe und Zeitbedarf ist bei der Ermittlung der Einflüsse der Input- auf die Outputwerte zu finden. Bei dieser Methodik wird die Ebene der Detaildimensionierungsgröße gewählt. Die drei Dimensionierungsgrößen jedes Gewerks werden in Detaildimensionierungsgrößen unterteilt und in die Matrix eingetragen.

Die nächste Tätigkeit besteht in der Befragung der Experten bezüglich deren Einschätzung des durchschnittlichen Einflusses jedes Hauptinputwertes auf die Detaildimensionierungsgrößen, die innerhalb seiner Planungstätigkeit liegen. Der Einfluss jedes Hauptinputwertes wird hierbei linearisiert und in sieben Gruppen unterteilt. Die sieben Gruppen zur Quantifizierung lehnen sich dabei an Touran (1993, S. 64) an, wobei sich die in dieser Arbeit vorgestellte Methode auf einer tieferen Detaillierungsebene befindet. Die erste Gruppe bezeichnet einen starken, positiven Einfluss des Inputwertes auf die Kosten der Detaildimensionierungsgröße, die zweite und dritte haben einen positiven Einfluss in unterschiedlicher Abstufung und die vierte hat keinen Einfluss. Ein positiver Einfluss bewirkt, dass eine Erhöhung des Inputwertes zu einer Erhöhung des Outputwertes, im vorliegenden Fall einer Erhöhung der Kosten der Detaildimensionierungsgröße, führt. Mit der fünften, sechsten und siebten Gruppe wird der negative schwache, gemäßigte und starke Einfluss bezeichnet, wobei negativ bedeutet, dass eine Erhöhung des Inputwertes zu einer Reduzierung der Detaildimensionierungsgrößen führt. Hilfreich für die Experten-schätzung ist zusätzlich eine übergreifende Definition für die Größe der Änderung des Inputwertes. In dieser Arbeit wird die Änderung in Prozent der Inputgröße hinsichtlich eines Standardprodukts angegeben und ein fixierter Prozentsatz für alle Inputgrößen verwendet.

In Tabelle 3.7 und in Abbildung 3.10 werden die Gruppen und zusätzlich die Interpretation des Einflusses als Einflussfaktor Ef_{DDim}^{Gew} je Detaildimensionierungsgröße $DDim$ und Gewerk Gew dargestellt. Die betont einprägsam gewählten und als Vorschlag dienenden Abstufungskategorien auf der Ratingskala von 25, 10 und 1 sollen dabei dem Experten helfen, die Auswirkung des Inputwertes einer möglichst passenden Kategorie zuzuord-

Einfluss	Kategorie	Einflussfaktor
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer gravierenden Erhöhung der Detaildimensionierungsgröße	starker positiver Einfluss	25
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer Erhöhung der Detaildimensionierungsgröße	gemäßigter positiver Einfluss	10
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer geringen Erhöhung der Detaildimensionierungsgröße	schwacher positiver Einfluss	1
Erhöhung des Inputwertes führt zu keiner Veränderung der Detaildimensionierungsgröße	kein Einfluss	0
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer geringen Reduktion der Detaildimensionierungsgröße	schwacher negativer Einfluss	-1
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer Reduktion der Detaildimensionierungsgröße	gemäßigter negativer Einfluss	-10
Erhöhung des Inputwertes führt zu einer gravierenden Reduktion der Detaildimensionierungsgröße	starker negativer Einfluss	-25

Tab. 3.7: Definition der Ratingskala für die Auswirkungen des Inputwertes auf die Detaildimensionierungsgröße

nen. Ausgehend vom Inputfaktor mit dem stärksten Einfluss, der den Gewichtungsfaktor von 25 erhält, werden die übrigen Inputfaktoren in Kategorien eingeteilt. Die Kategorien mit dem geringsten Einfluss minus und plus 1 beschreiben dabei Abhängigkeiten, die zwar nur 4 Prozent von der in diesem Modell maximal möglichen Abhängigkeit ausmachen, aber im Falle der Ermittlung von Korrelationen einen wichtigen Störfaktor darstellen können. Die Kategorien stellen einen Vorschlag dar, jedoch können sie im konkreten Anwendungsfall auch verändert werden, falls die beteiligten Experten feststellen, dass beispielsweise ein Inputfaktor im Vergleich zu den anderen wesentlich mehr Einfluss besitzt als im Verhältnis 25 zu 1 oder 5 zu 2. Im Zuge des Anwendungsfalls der Automobilproduktion von Gesamtfahrzeugen werden jedoch die vorgestellten Kategorien in Kapitel 5 verifiziert, wobei das Ergebnis der Verifikation diese Abstufung bestätigt.

Im nächsten Schritt beurteilt jeder Planer den durchschnittlichen Anteil an_{DDim}^{Gew} jeder Detaildimensionierungsgröße an Gesamtkosten der Dimensionierungsgröße in Prozent. Dies kann auf einer Expertenschätzung beruhen oder auch auf einer Analyse historischer Daten. Es besteht keine Notwendigkeit, dass die Kostenfunktionen in absoluten Werten abgebildet werden, da diese Methode lediglich darauf abzielt, die Korrelationen der Kostenfunktionen der Dimensionierungsgrößen zu ermitteln. Für die Korrelationsermittlung zweier Größen reicht eine Betrachtung der relativen Kostenfunktionen aus, da der Ein-

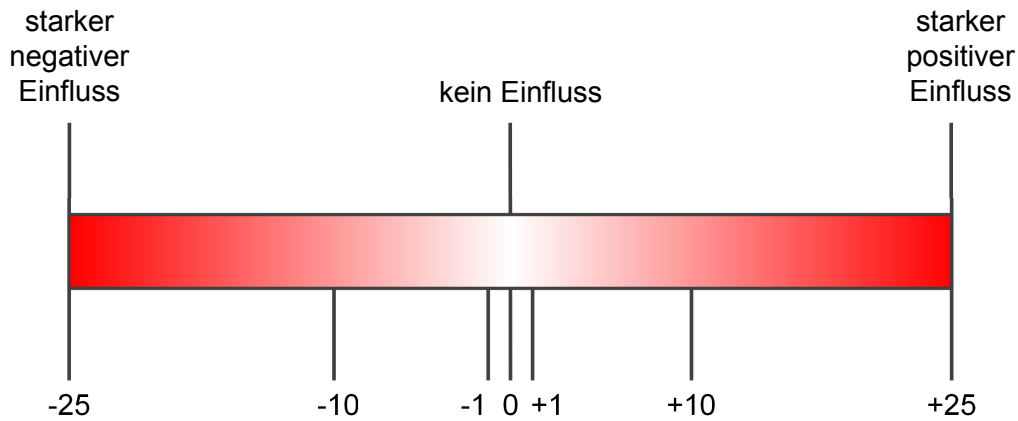


Abb. 3.10: Darstellung der Ratingskala für die Auswirkungen des Inputwertes auf die Detaildimensionierungsgröße

fluss der verschiedenen Einflussfaktoren zueinander im gleichen Verhältnis stehen wie bei der absoluten Kostenfunktion. Das Ergebnis für die Korrelation bleibt gleich.

Nach der Analyse vom Einfluss Ef_{DDim}^{Gew} jedes Inputwertes auf jede Detaildimensionierungsgröße können die Einflüsse zum Einflussfaktor Ef_{Dim}^{Gew} der einzelnen Dimensionierungsgrößen je Gewerk summiert werden. Je Dimensionierungsgröße und Gewerk werden die summierten Einflussgrößen gebildet, wobei mit n die variable Anzahl an Detaildimensionierungsgrößen je Dimensionierungsgröße und Gewerk definiert wird.

$$Ef_{Dim_{ij}}^{Gew} = \sum_n (an_{DDim_{ijn}}^{Gew} Ef_{DDim_{ijn}}^{Gew}) \quad (3.7)$$

Die Dimensionierungsgröße in Abhängigkeit von den Inputfaktoren kann folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$Dim_j(In_i) = Ef_{Dim_{1j}}^{Gew} x_{1j} + Ef_{Dim_{2j}}^{Gew} x_{2j} + \dots + Ef_{Dim_{ij}}^{Gew} x_{ij} \quad (3.8)$$

Nach der Summierung der Einflussfaktoren jedes Inputwertes In_i (mit i für die Anzahl der Inputwerte) auf jede Dimensionierungsgröße Dim_j (mit j für die Anzahl der Dimensionierungsgrößen) können diese Informationen in einer Einflussmatrix **MEf** abgebildet werden. Anders ausgedrückt wird durch diese Größe die Abhängigkeit jeder Detaildimensionierungsgröße von jedem Inputwert vereinfacht angegeben.

$$\mathbf{MEf}(Dim, In) = \begin{pmatrix} Dim_1(In_1) & Dim_2(In_1) & \dots & Dim_j(In_1) \\ Dim_1(In_2) & Dim_2(In_2) & \dots & Dim_j(In_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Dim_1(In_i) & Dim_2(In_i) & \dots & Dim_j(In_i) \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

Durch die Zuweisung des Einflussfaktors $Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}$ zu jeder Abhängigkeit resultiert die Einflussmatrix mit folgender Schreibweise:

$$\mathbf{MEf}(Ef) = \begin{pmatrix} Ef_{Dim_{11}}^{Gew} & Ef_{Dim_{12}}^{Gew} & \dots & Ef_{Dim_{1j}}^{Gew} \\ Ef_{Dim_{21}}^{Gew} & Ef_{Dim_{22}}^{Gew} & \dots & Ef_{Dim_{2j}}^{Gew} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Ef_{Dim_{i1}}^{Gew} & Ef_{Dim_{i2}}^{Gew} & \dots & Ef_{Dim_{ij}}^{Gew} \end{pmatrix} \quad (3.10)$$

Für jede Dimensionierungsgröße kann in Folge eine Abhängigkeitsfunktion gebildet werden. Um die Abhängigkeitsfunktionen der einzelnen Dimensionierungsgrößen vergleichbar zu machen, werden die Funktionen prozentuell dargestellt. Es wird die Gesamtsumme SEf_{Dim_j} der Absolutwerte der Einflussfaktoren für jede Dimensionierungsgröße Dim_j ermittelt:

$$SEf_{Dim_j} = \sum_i |Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}| \quad (3.11)$$

Durch Division des Einflussfaktors jeder Dimensionierungsgröße durch die Gesamtsumme werden die relativen Einflussfaktoren ermittelt und dadurch kann die relative Abhängigkeitsfunktion jeder Dimensionierungsgröße gebildet werden.

$$Dim_{relativ_j}(In_i) = \frac{Ef_{Dim_{1j}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}} x_{1j} + \frac{Ef_{Dim_{2j}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}} x_{2j} + \dots + \frac{Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}} x_{ij} \quad (3.12)$$

Die relativen Einflussfaktoren können in einer relativen Einflussmatrix $\mathbf{MEf}_{relativ}$ dargestellt werden.

$$\mathbf{MEf}_{relativ}(Ef_{relativ}) = \begin{pmatrix} \frac{Ef_{Dim_{11}}^{Gew}}{SEf_{Dim_1}} & \frac{Ef_{Dim_{12}}^{Gew}}{SEf_{Dim_2}} & \dots & \frac{Ef_{Dim_{1j}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}} \\ \frac{Ef_{Dim_{21}}^{Gew}}{SEf_{Dim_1}} & \frac{Ef_{Dim_{22}}^{Gew}}{SEf_{Dim_2}} & \dots & \frac{Ef_{Dim_{2j}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{Ef_{Dim_{i1}}^{Gew}}{SEf_{Dim_1}} & \frac{Ef_{Dim_{i2}}^{Gew}}{SEf_{Dim_2}} & \dots & \frac{Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}}{Sum_{SEf_j}} \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

Jede Spalte der relativen Einflussmatrix ergibt die relative Abhängigkeitsfunktion für eine Dimensionierungsgröße. Mit dieser relativen Abhängigkeitsfunktion können die prozentuellen Abweichungen der Dimensionierungsgröße bei prozentuellen Änderungen der Inputfaktoren ermittelt werden.

Im Schritt A zur Ermittlung der Kostenfunktionen werden mehrere Vereinfachungen im Hinblick auf eine effiziente Erhebung der Abhängigkeitsverhältnisse der Outputdaten zu

den Inputdaten bei der Fabrikplanung getroffen. Die Einflüsse der Inputwerte auf die Detaildimensionierungsgrößen werden linear abgebildet, obwohl in Realität andere Funktionen vorhanden sein können. Zusätzlich ist die Liste der Inputwerte nach dem Pareto-Prinzip auf die wichtigsten Werte reduziert. Darauf folgend werden die Einflüsse in sieben Einflussgruppen unterteilt und kategorisiert. Diese Einflussgruppen beinhalten sieben Werte über die Höhe des Einflusses. Im Zuge der Verifikation in Kapitel 5.2.1 werden die mit diesem Berechnungsmodell ermittelten Korrelationskoeffizienten mit Koeffizienten auf der Basis historischer Daten verglichen und deren Abweichungen analysiert. Diesen Ansatz der Linearisierung und Fokussierung auf die wichtigsten Einflussgrößen verfolgen ebenfalls Farineau et al. (2001, S. 83 ff.) in ihrer Arbeit, wobei sie damit zufriedenstellende Ergebnisse verifizieren konnten.

Besondere Bedeutung besitzt dieser Schritt bei Unternehmen, bei denen ein detailliertes Kostenmodell nur mit sehr hohem Aufwand ermittelbar ist. Hierfür existiert eine Vielzahl von Gründen. Einerseits kann eine sehr hohe Anzahl an möglichen Produktvarianten sowie ein hoher Komplexitätsgrad des Produktes den Aufwand bei der Erhebung des Kostenmodells erheblich steigern, andererseits kann das Vorhandensein von nur wenigen, dafür aber über einen langen Zeitraum produzierten Produkten die Verallgemeinerung der Beziehungen zu einem Kostenmodell erschweren (vgl. Buch et al. (2011, S. 3002)). Zusätzlich kann hinzukommen, dass aufgrund ungenügender Dokumentation keine klare Beziehung der Inputdaten zu den Kostendaten hergestellt werden kann, da sich die Ausgangsbasis laufend von den Produkthanbahnungen bis weit nach Produktionsstart ändern kann. Touran & Wiser (1992, S. 64) schlagen in einem solchen Fall die direkte Schätzung der Korrelationen durch Experten vor. Mit dem hier vorgestellten Schritt zur Ermittlung eines relativen Kostenfaktormodells auf Basis von relativen Kostenabhängigkeit kann die Treffsicherheit bei für Anwender komplexen Abhängigkeitsverhältnissen der Korrelationskoeffizienten gesteigert werden. Die Schätzungen der Abhängigkeiten finden auf einer viel tieferen Aggregationsebene statt.

Ermittlung der Einflussfaktoren der Dimensionierungsgrößen anhand eines Kostenmodells - Schritt B

Sind im Unternehmen Kostenmodelle für die Fabrikplanung vorhanden oder sind die Abhängigkeitsverhältnisse der Planung parametrisiert, dann kann direkt aus den vorhandenen Modellen das relative Abhängigkeitsmodell generiert werden. Um das relative Kostenfaktormodell von Schritt A zu verifizieren, kann ebenfalls ein umfangreiches Kostenmodell erstellt und für einen Vergleich herangezogen werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Erstellung eines detaillierten Modells sich als sehr aufwändig gestalten kann. Komplexe Abhängigkeitsverhältnisse und vorhandene Nicht-Linearitäten können die Modellbildung erschweren. Dennoch bleiben die Outputwerte des mathematischen Modells dieselben wie in Schritt A. Die Inputwerte des mathematischen Modells basieren

auf denselben wie in Schritt A, es besteht jedoch die Möglichkeit, dass diese detaillierter abgebildet und zusätzlich Abhängigkeiten der Outputwerte untereinander berücksichtigt werden. Die Dimensionierungsgrößen werden somit als Funktion von verschiedenen Parametern beschrieben, die unter anderem aus der parametrischen Beschreibung von Produkteigenschaften, aus Auslegungs- und Ressourcenparametern im Zuge der Fabrikplanung sowie den übrigen Dimensionierungsgrößen bestehen können (vgl. Koonce et al. (2006, S. 42)). Vielfach können diese Kostenabhängigkeitsverhältnisse, sogenannte Cost Estimation Relationships (CER), aufgrund statistischer Methoden auf der Datenbasis vergangener Produkte erhoben werden, wobei nur elementare Informationen der Produkt- und Produktionsbeschreibungen verwendet werden (Gudmundsson (2014, S. 34)).

Ermittlung der Einflussfaktoren der Dimensionierungsgrößen anhand eines spezifischen Kostenmodells - Schritt C

Besteht im Unternehmen keine Möglichkeit, übergreifende Kostenfunktionen für Produkte oder Projekte entweder vereinfachend oder detailliert abzubilden, kann eine Einflussmatrix für jedes Produkt oder Projekt nach der Erstkalkulation eigens erstellt werden. Der nachfolgende Weg zur Ermittlung der Korrelation steht in dieser Form offen, jedoch werden die Zusammenhänge nicht allgemeingültig erhoben, sondern müssen für jede Kalkulation neu erstellt werden.

Ermittlung des Korrelationskoeffizienten auf Basis der Einflussfaktoren

Basierend auf den Einflussfaktoren aus den Schritten A, B oder C können die Korrelationen der Dimensionierungsgrößen ermittelt werden. Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung der Pearsonschen Korrelationskoeffizienten r , der einen Schätzwert für den Korrelationskoeffizienten $\rho_{Dim_i Dim_j}$ für jede Dimensionierungsgröße pro Gewerk mit jeder anderen Dimensionierungsgröße darstellt. Die Korrelationskoeffizienten können in einer Korrelationsmatrix **Corr** zusammengefasst werden. An dieser Stelle kann auf die Symmetriebedingung vom Korrelationskoeffizienten in Gleichung 2.39 zurückgegriffen werden. Es folgt:

$$\rho_{Dim_i Dim_j} = \rho_{Dim_j Dim_i} \quad (3.14)$$

Zu berücksichtigen ist außerdem, dass der Korrelationskoeffizient einer Dimensionierungsgröße mit sich selbst den Wert 1 erhält, die Dimensionierungsgröße korreliert also mit sich selbst vollkommen positiv (siehe Gleichung 2.36).

$$\rho_{Dim_i Dim_i} = 1 \quad (3.15)$$

Die Korrelationen der Dimensionierungsgrößen, basierend auf der relativen Abhängigkeitsfunktion von Gleichung 3.12 beziehungsweise von Matrix 3.13, können im nächsten Schritt ermittelt werden. Zur Interpretation der Korrelation wird Abbildung 2.31 herangezogen.

Ausgehend von den Extremfällen wird der Korrelationskoeffizient $\rho_{Dim_i Dim_j}$ mit Gleichung 3.17 definiert. Bei allen Werten zwischen den Extremwerten werden mit dieser Gleichung Schätzer für den Koeffizienten ermittelt. Die Ermittlung der Schätzer basiert auf Stichprobenwerten, die als Input für Gleichung 3.17 dienen. Statistische Werte aus der Vergangenheit bieten hierfür oft eine ungenügende Basis, um diese Korrelationen zu quantifizieren (vgl. Khodakarami & Abdi (2014)). Im hier vorgestellten Ansatz wird gezeigt, dass die Stichprobenwerte mit dem mathematischen Modell in geeignetem Umfang selbst generiert werden kann. Es ist nicht erforderlich, kausale Zusammenhänge zu analysieren, da diese in den Kostenfunktionen implizit vorhanden sind. Nachdem die Kostenfunktionen für die Dimensionierungsgrößen in einem Modell abgebildet sind, besteht die Möglichkeit, durch Variation von bestimmten Werten, beliebig viele Stichprobenwerte selbst zu erzeugen. Während die Unsicherheiten im Bezug auf die Produkt- und Produktionsinformationen durch Verteilungsfunktionen der Inputwerte In_i quantifiziert werden können, ist es möglich, die Unsicherheiten hinsichtlich der Prozess- und Ressourceninformationen durch Verteilungsfunktionen der relativen oder absoluten Einflussfaktoren In_i abzubilden. Nachdem in diesem Schritt ermittelt wird, welche Korrelationen die einzelnen Dimensionierungsgrößen zueinander besitzen, ist eine bestimmte Verteilungsform der Inputwerte nicht erforderlich. Im Vordergrund steht die Abbildung der Auswirkungen durch Änderung der Inputfaktoren und Einflussfaktoren innerhalb vorab definierter, möglicher Grenzen. Der Bereich der Inputwerte und Einflussfaktoren soll hierbei möglichst gleichmäßig ausgeschöpft werden, damit daraus eine entsprechend breite Streuung der Ergebnisse resultiert. Es wird analysiert, ob bei diesen Änderungen ein ähnliches Verhalten von zwei Dimensionierungsgrößen zu erkennen ist und ob die Gemeinsamkeit durch einen linearen Wert beschrieben werden kann. Als Basis für die Analyse dient eine Anzahl von Wertepaaren. In der Literatur finden sich zufriedenstellende Ergebnisse mit 100 bis 50000 Wiederholungen, wobei ältere Veröffentlichungen aufgrund der beschränkten Berechnungsmöglichkeiten mit den damals verfügbaren Computern zu Wiederholungen mit einer geringeren Anzahl tendieren (vgl. beispielsweise Bakhshi & Touran (2012, S. 140), Zhang et al. (2011, S. 597), Rimpau (2010, S. 150) Elkjaer (2000, S. 145), Touran & Wisser (1992, S. 264) und Iman & Conover (1982, S. 321)). Im Zuge der Verifikation in Kapitel 5.2.1 wird das Ergebnis und die Bedienbarkeit von Microsoft® Office Excel® als Simulationstool mit der Anzahl von 10000 Wiederholungen als zufriedenstellend ermittelt. Die Werte der zu vergleichenden Dimensionierungsgrößen von den gleichen Inputwerten werden zu Wertepaaren kombiniert.

Eine gleichmäßige Streuung von Werten, wie im vorherigen Absatz gefordert, bietet die Gleichverteilung (Kreyszig (1999, S. 1075 f.)). Eine computerunterstützte Methode

zur Generierung von zufälligen Werten wird als zufallsbedingte digitale Simulation oder Monte-Carlo-Simulation (MCS) bezeichnet (vgl. Bronstein et al. (2000, S. 804 ff.)). Eine spezielle Form der MCS stellt die Generierung von gleichverteilten zufälligen Werten innerhalb definierter Grenzen dar. Jede gemeinsame Simulation aller Inputwerte und Einflussfaktoren definiert einen spezifischen Anwendungsfall der Fabrikplanung. Mithilfe der Monte-Carlo-Simulation werden 10000 Simulationen von möglichen Anwendungsfällen erzeugt, wobei ein Datensatz aller Inputwerte und aller Einflussfaktoren mit einer Anzahl von 10000 Simulationen generiert wird. Als Input für die Berechnung jeder Dimensionierungsgröße Dim_j existiert somit ein spezifischer Wert für jeden Inputwert In_i und für jeden Einflussfaktor. Für die relativen Kostenfaktormodelle werden dafür relative Änderungen der Inputwerte betrachtet, während für absolute Kostenmodelle absolute Änderungen notwendig sind. Über die spezifische Gleichung jeder Dimensionierungsgröße (siehe Gleichungen 3.8 und 3.12) werden die Ergebnisse für jeden Datensatz ermittelt. Für jede Dimensionierungsgröße resultieren also auch 10000 Ergebnisse oder auch Punktschätzer. Es entsteht ein Datensatz für alle Dimensionierungsgrößen, die einem bestimmten Datensatz der Inputwerte und Einflussgrößen zugeordnet werden können, wie in Tabelle 3.8 dargestellt wird. Mittels des modellierten Experten-Know-hows bezüglich Dimensionierung der Fabrik und Abhängigkeit der Dimensionierungsgrößen kann schnell und effizient ein Datensatz an Ergebnissen generiert werden, der eine Korrelationsanalyse ermöglicht. Es wird somit ein Zufallsvektor **Dim** für die Fabrikplanung im mehrdimensionalen Raum generiert.

$$\mathbf{Dim} = \begin{pmatrix} Dim_1 \\ Dim_2 \\ \vdots \\ Dim_n \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Für die Ermittlung des Korrelationskoeffizienten auf Basis der Stichprobenwerte wird Gleichung 3.17 nach der sogenannten Pearson-Korrelation für den Datensatz der Dimensionierungsgrößen mit $n=10000$ herangezogen. Die Methodik der Varianzaggregation nach Markowitz wird in diesem beschriebenen Ansatz in die Fabrikplanung übertragen. Die Variablen Dim_k und Dim_l stehen hierbei für ein beliebig ausgewähltes Dimensionierungsgrößenpaar der Fabrikplanung.

$$r_{Dim_k Dim_l} = \frac{\sum_{m=1}^n (Dim_{k_m} - \overline{Dim_k})(Dim_{l_m} - \overline{Dim_l})}{\sqrt{\sum_{m=1}^n (Dim_{k_m} - \overline{Dim_k})^2 \sum_{m=1}^n (Dim_{l_m} - \overline{Dim_l})^2}} \quad (3.17)$$

Es resultieren beliebige Werte zwischen den Extremwerten Minus 1 und Plus 1. Nur in den beiden Extremwerten und beim Ergebnis 0 ist der Korrelationskoeffizient eindeutig bestimmt (vgl. Touran & Wisser (1992) und Yang (2004)). Die Werte dazwischen werden

Art der Werte	Anzahl der Werte	Methode zur Ermittlung der Werte
relativer oder absoluter Inputwert In_i	10000 je i	Monte-Carlo-Simulation
relativer oder absoluter Einflussfaktor $\frac{Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}}$ bzw. $Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}$	$i * j$	Kostenanalyse
Input-Datensatz bestehend aus den Inputwerten In_i	10000	Monte-Carlo-Simulation
Einflussfaktor-Datensatz bestehend aus den Einflussfaktoren $\frac{Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}}{SEf_{Dim_j}}$ oder $Ef_{Dim_{ij}}^{Gew}$	1	Kostenanalyse
Dimensionierungsgröße Dim_j	10000 je j	Kalkulation mit den Input-Datensätzen und Einflussfaktor-Datensätzen über Gleichung 3.8 beziehungsweise 3.12
Dimensionierungsgrößen-Datensatz bestehend aus den Dimensionierungsgrößen Dim_j	10000	Kalkulation mit den Input-Datensätzen über Gleichung 3.8 beziehungsweise 3.12
Korrelationskoeffizient ρ	j^2	Schätzung mit den Dimensionierungsgrößen-Datensätzen

Tab. 3.8: Definition der Datensätze zur Ermittlung des Korrelationskoeffizienten

als Schätzer bezeichnet. Nach der Ermittlung der Korrelationskoeffizienten bei allen möglichen Paaren von Dimensionierungsgrößen können die Koeffizienten in einer Korrelationsmatrix **Corr** des Zufallsvektors **Dim** aller Verteilungen der Dimensionierungsgrößen zusammengefasst werden. Hierbei wird angenommen, dass die Schätzwerte der Korrelationskoeffizienten r eine hinreichende Beschreibung der Korrelationskoeffizienten ρ der Grundgesamtheit darstellen, weshalb in weiterer Folge der griechische Buchstabe ρ verwendet wird.

$$\mathbf{Corr}(\mathit{Dim}) = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{\mathit{Dim}_1\mathit{Dim}_2} & \cdots & \rho_{\mathit{Dim}_1\mathit{Dim}_n} \\ \rho_{\mathit{Dim}_2\mathit{Dim}_1} & 1 & \cdots & \rho_{\mathit{Dim}_2\mathit{Dim}_n} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \rho_{\mathit{Dim}_n\mathit{Dim}_1} & \rho_{\mathit{Dim}_n\mathit{Dim}_2} & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3.18)$$

Überprüfung und Test des Korrelationskoeffizienten

Die erste Überprüfung der Korrelationskoeffizienten erfolgt gemeinsam mit den Planungsexperten. Hierbei wird die Plausibilität der linearen Abhängigkeit der einzelnen Dimensionierungspaare geprüft und gegebenenfalls das Berechnungsmodell an neue Erkenntnisse angepasst. Hierbei können auch Vergleiche zwischen Korrelationen, die auf Basis bereits oder in der Zwischenzeit gelegter Angebote ermittelt werden, und den mit der beschriebenen Methodik berechneten dienen. Ziel ist hierbei eine fortlaufende Verbesserung und Anpassung des relativen Kostenfaktormodells.

Die Anwendung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ergibt Schätzer als Maß für die lineare Abhängigkeit. Für die Anwendung von Schätzern in der Statistik existieren etablierte Ermittlungen des Konfidenzintervalls und Tests auf Signifikanz, wie in Kapitel 2.6.4 beschrieben wird. Im ersten Schritt wird überprüft, ob jeder Korrelationskoeffizient von 0 abweicht. Ergibt die Signifikanzüberprüfung, dass ein Korrelationskoeffizient nicht signifikant von 0 abweicht, wird die Plausibilität des Korrelationswertes nach Gleichung 3.17 gemeinsam mit dem Experten überprüft, und gegebenenfalls mit 0 ersetzt und so in der Korrelationsmatrix nach Gleichung 3.18 geführt. Das Niveau α , das die Signifikanz definiert, dass der Korrelationskoeffizient mit der Wahrscheinlichkeit α nicht von 0 abweicht, wird im vorliegenden Fall mit 5 Prozent angenommen. (vgl. Kreyszig (1979, S. 316 ff.))

Bei dieser vorgestellten Methodik entsteht eine übersichtliche Anzahl an Korrelationen. Dadurch wird ermöglicht, dass der Anwender und entsprechende Planungsexperten die ermittelten Korrelationen hinsichtlich sogenannter „Nonsens-Korrelationen“ überprüfen. Eine solche Art von Korrelationen wird als „Korrelation ohne sachlogischem Zusammenhang“ direkt definiert (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 143) und Kreyszig (1979, S. 310)).

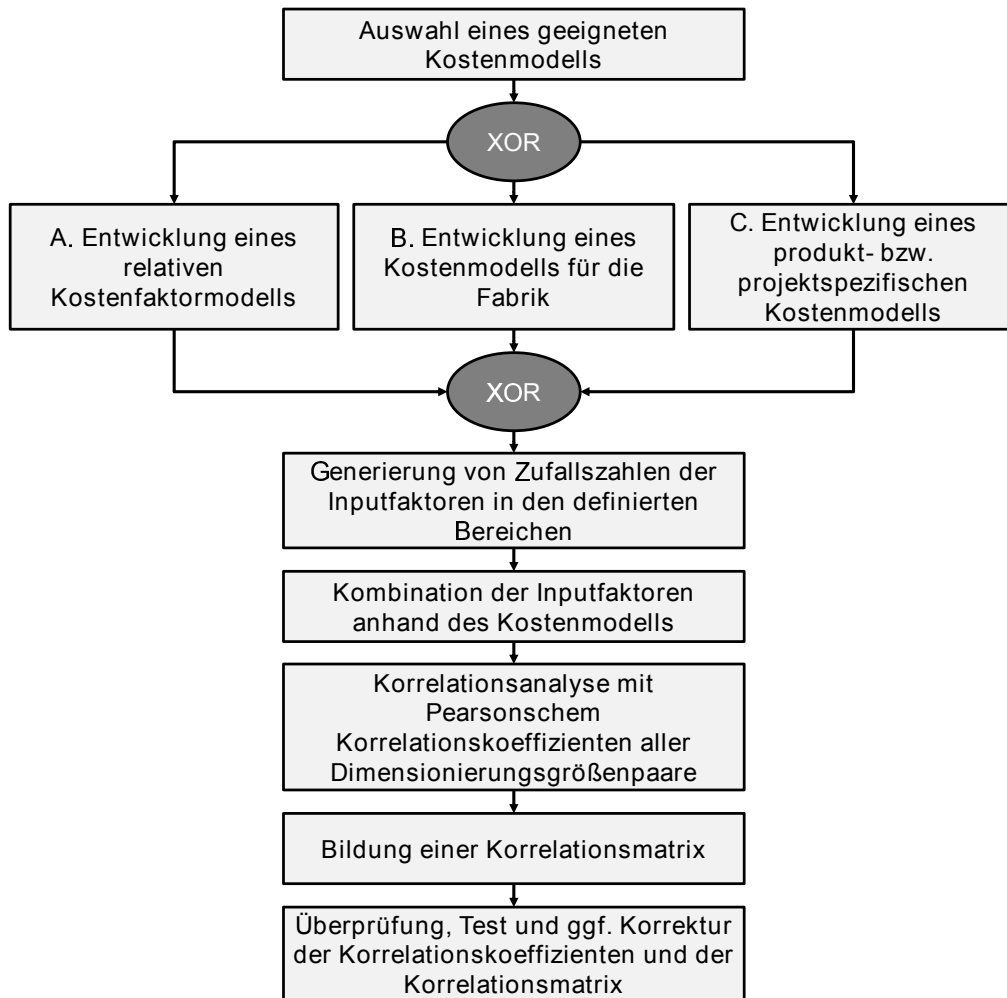
Im Fall der Dimensionierungsgrößen ergeben sich die Korrelationen hauptsächlich aufgrund der gemeinsamen Abhängigkeiten von denselben Inputwerten. Im Falle der Fabrikplanung sind diese Korrelationen, also die mit gemeinsamen Abhängigkeiten, von besonderem Interesse. Jeder Planungsexperte kann mit entsprechendem Expertenwissen abschätzen, ob die Korrelation seinen Erfahrungen aus vorangegangenen Planungen entspricht. Sind die Abhängigkeiten von den Inputwerten jedoch fehlerhaft beziehungsweise zu stark vereinfacht im Kostenmodell abgebildet, so können entscheidende Abweichungen bei den Korrelationen resultieren. In diesem Fall müssen die Kostenabhängigkeiten neu modelliert werden.

Im nächsten Schritt wird der Konfidenzintervall für jeden Korrelationskoeffizienten ermittelt. Ein Überblick über dieses Vorgehen wird in Kapitel 2.6.4 gegeben. Mit dem Konfidenzintervall wird die Information gewonnen, in welchem Intervall der Korrelationskoeffizient mit einer vorab definierten Wahrscheinlichkeit liegen wird. Eine hinreichend genaue Wahrscheinlichkeit liegt in der Statistik im Allgemeinen bei 95 Prozent (vgl. Kreyszig (1979, S. 205)) vor. Die Information wird als Basis für den nächsten Überprüfungsschritt gewählt.

Eine Korrelationsmatrix ist per Definition positiv semidefinit beziehungsweise positiv definit (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 66)). Diese Anforderung an die Matrix für jeden Anwendungsfall wird im letzten Schritt überprüft. Die Überprüfungsmethoden mit den Eigenwerten dieser Matrix wird in Kapitel 2.6.3 vorgestellt. Ergibt die Überprüfung, dass die Matrix diese Anforderung nicht erfüllt, so kann darauf geschlossen werden, dass die im Modell getroffenen Vereinfachungen, Annahmen und Annäherungen zu diesem Fehler führen und die Gleichungen, auf denen die Ermittlung der Korrelationskoeffizienten beruht, nicht exakt genug sind (vgl. Yang (2008, S. 352), Kurowicka & Cooke (2006, S. 102) und Touran & Wisner (1992, S. 268)). Dieses Problem wird in der relevanten Forschung vielfach untersucht und es existieren verschiedene Methoden, um die Matrix zu reparieren (vgl. Yang (2008), Kurowicka & Cooke (2006, S. 102 ff.), Higham (2002, S. 329 ff.) und Touran (1993, S. 268)). Diese können aus einem einfachen, manuellen und iterativen Vorgehen (vgl. Touran (1993, S. 268)) bis hin zu automatisierten Routinen mit entsprechenden mathematischen Modellen bestehen (vgl. Yang (2008, S. 352) und Higham (2002, S. 329 ff.)). Im jeweiligen Anwendungsfall muss eine entsprechende Reparaturmethode ausgewählt werden, wobei an dieser Stelle auf die entsprechende Literatur verwiesen wird. Generell wird als Ziel definiert, dass die Matrix nach Anwendung der Reparaturmethode möglichst nahe an der ursprünglichen Matrix liegt und die neu ermittelten Korrelationskoeffizienten innerhalb des ermittelten Konfidenzintervalls liegen (vgl. Yang (2008, S. 355) und Kurowicka & Cooke (2006, S. 107)).

Vorgehensmethode zur Analyse von Korrelationen von Dimensionierungsgrößen in Unternehmen

Eine allgemeine Vorgehensmethode zur Analyse der Korrelation von Dimensionierungsgrößen im Zuge der Fabrikplanung kann von den Detailschritten abgeleitet werden, wie in Abbildung 3.11 dargestellt ist.



XOR ... ausschließendes Oder

Abb. 3.11: Darstellung der Hauptprozessschritte zur Ermittlung der Korrelationen der Dimensionierungsgrößen im Zuge der frühen Fabrikplanung

Ausgehend von der Auswahl eines geeigneten Kostenmodells, mit dem die Korrelationen ermittelt werden können, kann die Methode in sieben Arbeitsschritten erfolgen. Für dieses Kostenmodell besteht die Anforderung, dass es einerseits mit vertretbarem Aufwand ermittelt werden kann und andererseits, dass die Kosteneinflüsse mit ausreichender Genauigkeit dargestellt werden, um im Anschluss die Korrelationen der Dimensionierungsgrößen ermitteln zu können. Je nach Möglichkeit im Unternehmen kann ein relatives

Kostenfaktorenmodell, ein detailliertes Kostenmodell für die Fabrik, sowie ein für das spezifische Produkt beziehungsweise Projekt eigens entwickeltes Kostenmodell ausgewählt und adaptiert werden. Jedes dieser Modelle beinhaltet die Beziehungen der Dimensionierungsgrößen als Output mit den Inputfaktoren. Für die Inputfaktoren können ausgewählte Bereiche definiert werden, in denen sie sich im Allgemeinen bewegen. Bei einer Generierung von einer großen Anzahl Zufallszahlen je Inputwert im jeweiligen Bereich können ebenso viele Ergebnisse der Dimensionierungsgrößen ermittelt werden. Basierend auf diesen Ergebnissen können die Korrelationen von allen Paarbeziehungen der Dimensionierungsgrößen mithilfe des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten analysiert und in einer Korrelationsmatrix abgebildet werden. Im letzten Schritt werden die Korrelationskoeffizienten und die gesamte Korrelationsmatrix überprüft, getestet und gegebenenfalls korrigiert. Als Resultat existiert somit eine abgesicherte Korrelationsmatrix entweder für die allgemeine Produktionssituation beim spezifischen Unternehmen oder eine spezifische Korrelationsmatrix bei gegebenen Voraussetzungen.¹

Die spezifische Korrelationsmatrix besitzt nur für den ermittelten Fall Gültigkeit und muss für alle Kalkulationen neu ermittelt werden. Die allgemeinen Korrelationsmatrizen aus Schritt A und B sind jedoch für einen allgemeingültigen Fall im Unternehmen erstellt. Bei groben Änderungen der Rahmenbedingungen, wie zum Beispiel Einführung neuer Produktionstechnologien oder Prozesse, muss jedoch überprüft werden, ob dadurch entscheidende Veränderungen in den Korrelationen ausgelöst und gegebenenfalls adaptiert werden. Im ersten Schritt kann hierfür eine Expertenschätzung reichen, jedoch muss für eine vollständige Überprüfung das Kostenmodell neu erstellt und der beschriebene Prozess neu durchlaufen werden. Zusätzlich ist es vorteilhaft, die allgemeinen Korrelationsmatrizen in einen ständigen Verbesserungsprozess zu integrieren. Sind im Zug der Angebotslegung mehrere detaillierte Vorkalkulationen vorhanden, können die Korrelationskoeffizienten auf Basis dieser historischen Daten berechnet und mit den Koeffizienten aus dem Kostenmodell verglichen werden. Bei Abweichungen ist das Kostenmodell zu überprüfen und zu überarbeiten.

Ermittlung der Kovarianzmatrix auf Basis der Korrelationsmatrix

Ausgehend von der Korrelationsmatrix wird die Kovarianzmatrix gebildet, wobei Gleichung 3.19, abgeleitet von Gleichung 2.31, als Basis für die Überleitung von der Korrelationsmatrix zur Kovarianzmatrix dient.

$$Cov(Dim_i Dim_j) = \rho_{Dim_i Dim_j} \sqrt{Var(Dim_i) Var(Dim_j)} \quad (3.19)$$

Analog zur Kovarianzmatrix 2.34 der Portfolio-Theorie kann die Kovarianzmatrix der Fabrikplanung definiert werden:

¹ Relevante Teile der Vorgehensweise wurden als Patent A 568/2014 (vgl. Unzeitig (2014)) eingereicht.

$$\mathbf{MCov}(Dim) = \begin{pmatrix} Cov(Dim_1Dim_1) & Cov(Dim_1Dim_2) & \cdots & Cov(Dim_1Dim_n) \\ Cov(Dim_2Dim_1) & Cov(Dim_2Dim_2) & \cdots & Cov(Dim_2Dim_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(Dim_nDim_1) & Cov(Dim_nDim_2) & \cdots & Cov(Dim_nDim_n) \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Setzt man Gleichung 3.19 in die Kovarianzmatrix 3.20 ein und berücksichtigt Gleichung 2.36, ergibt sich folgende Matrix, abhängig von den Varianzen der einzelnen Dimensionierungsgrößen und den ermittelten Korrelationskoeffizienten:

$$\mathbf{MCov}(D) = \begin{pmatrix} Var(D_1) & \cdots & \rho_{D_1D_n} \sqrt{Var(D_1)Var(D_n)} \\ \rho_{D_2D_1} \sqrt{Var(D_2)Var(D_1)} & \cdots & \rho_{D_2D_n} \sqrt{Var(D_2)Var(D_n)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{D_nD_1} \sqrt{Var(D_n)Var(D_1)} & \cdots & Var(D_n) \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Aus Platzgründen wird in Matrix 3.21 die Variable *Dim* mit *D* ersetzt.

Die Varianz jeder Dimensionierungsgröße wird durch den Planungsexperten über Gleichung 3.5 geschätzt. Die Kovarianzmatrix ist analog der Korrelationsmatrix ebenfalls positiv-definit beziehungsweise semipositiv-definit (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 66)). Für die Überprüfung der ermittelten Kovarianzmatrix werden die Eigenwerte der Korrelationsmatrix ermittelt, wobei dies in Kapitel 2.6.3 vorgestellt wird. Für eventuelle Reparaturen der Matrix wird auf die Literatur verwiesen (vgl. Touran (1993, S. 268), Yang (2008, S. 357 ff.) und Kurowicka & Cooke (2006, S. 102 ff.)).

Analysemöglichkeit auf Basis der Korrelationsmatrix

Mit den Informationen in der Kovarianzmatrix besteht die Möglichkeit einer ersten Analyse hinsichtlich der Auswirkung der modellierten Unsicherheiten auf das aggregierte Gesamtergebnis. Betrachtet man die Varianzen alleine, und sortiert sie nach Größe der Werte, haben die größten Varianzen auch den größten Einfluss auf die aggregierte Gesamtvarianz. Zusätzlich können alle Einträge in der Kovarianzmatrix hinsichtlich der größten Gesamteinträge analysiert werden. Zusätzlich zu den Varianzen können noch große Kovarianzen hinzukommen. Da die Kovarianzen alleine eine Funktion der Varianzen und Korrelationskoeffizienten sind, können von Natur aus nur jene Kovarianzen große Werte erhalten, die auch große Varianzen enthalten. Als erste Analyse hinsichtlich des Gesamtergebnisses kann schon an dieser Stelle festgestellt werden, dass Varianzen mit hohen Werten auch die Kovarianzen entscheidend beeinflussen. Besitzen beide Varianzen des

betrachteten Dimensionierungsgrößenpaars hohe Werte und zusätzlich eine hohe positive Korrelation, entsteht in der Kovarianzmatrix ein Zusatzfeld mit sehr hohem Wert in ähnlich hoher Dimension wie bei den zwei Varianzen. Nachdem die Kovarianz als Faktor die Wurzel beider multiplizierten Varianzen enthält, behält die Kovarianz immer noch einen ähnlich großen Wert wie die größere Varianz. Beinhaltet die Kovarianz einen kleinen Korrelationskoeffizienten, reduziert sich deren Bedeutung auf das Gesamtergebnis.

Tritt jedoch der Fall auf, dass zwar beide Varianzen des Paares der Dimensionierungsgrößen in dieser Matrix große Werte einnehmen, aber die Korrelation einen großen negativen Wert ergibt, dann reduziert diese Kovarianz das Risiko im Gesamtergebnis ganz entschieden. Große negative Korrelationen von Dimensionierungsgrößen mit großen Varianzen reduzieren also das Gesamtergebnis beträchtlich. Aufgrund der hohen Abhängigkeit voneinander besitzen diese Dimensionierungsgrößen ein sich ausgleichendes Verhalten. Tritt der Fall ein, dass der Bedarf bei der einen Größe vom Mittelwert wesentlich nach oben abweicht, so weicht aufgrund der hohen Korrelation der andere von seinem Mittelwert wesentlich nach unten ab. Beide Abweichungen geschehen jedoch innerhalb des definierten Bereichs. Ist der Bereich ähnlich hoch definiert, können sich die Abweichungen ausgleichen. Dieser Ausgleich entsteht wechselseitig bei Abweichungen vom Mittelwert sowohl nach oben als auch nach unten.

Abbildung 3.12 bietet als normiertes Varianz-Kovarianzdiagramm eine Übersicht über mögliche Ergebnisse für eine Kovarianz $Cov(X_i X_j)$, die auf Basis der Korrelation von zwei Zufallsvariablen X_i zu X_j mit den Varianzen $Var(X_i)$ und $Var(X_j)$ ermittelt wird. Normierte Darstellungen bieten den Vorteil einer besseren Vergleichbarkeit verschiedener Projekte, da die Werte die gleiche Größenordnung aufweisen (vgl. Weigert & Rose (2011, S. 34)). Im vorliegenden Fall wird angenommen, dass die Varianz $Var(X_i)$ die größere der beiden ist. Die Varianz $Var(X_j)$ wird im Verhältnis zu $Var(X_i)$ dargestellt. Es soll sowohl der Einfluss des Verhältnisses von den zwei Varianzen als auch der Einfluss durch den Korrelationskoeffizienten auf die gemeinsame Kovarianz gezeigt werden. Der mögliche Bereich der Abszisse wird mit 0 und 1 definiert und den Bereich der Ordinate begrenzen die beiden Extremfälle der vollkommen positiven sowie negativen Korrelation. Ausgehend von Gleichung 3.19 erhält man folgende Gleichung für die Kovarianz von X_i und X_j :

$$Cov(X_i X_j) = \rho_{X_i X_j} \sqrt{Var(X_i) Var(X_j)} \quad (3.22)$$

Substituiert man die Varianz $Var(X_j)$ mit dem konstanten Verhältnis $Var(X_j)/Var(X_i)$ und der Varianz $Var(X_i)$, so ergibt sich folgender Ausdruck:

$$Cov(X_i X_j) = \rho_{X_i X_j} \sqrt{Var(X_i) Var(X_i) \left(\frac{Var(X_j)}{Var(X_i)} \right)} = \rho_{X_i X_j} \sqrt{Var(X_i)^2 \frac{Var(X_j)}{Var(X_i)}} \quad (3.23)$$

Im nächsten Schritt kann die Varianz vor den Wurzelausdruck gebracht werden. Dadurch bleibt nur noch das Verhältnis von den Varianzen unter der Wurzel.

$$Cov(X_i X_j) = \rho_{X_i X_j} Var(X_i) \sqrt{\frac{Var(X_j)}{Var(X_i)}} \quad (3.24)$$

Das Verhältnis der resultierenden Kovarianz $Cov(X_i X_j)$ zur Varianz $Var(X_i)$ ist somit proportional zur Wurzel aus dem Verhältnis $Var(X_j)/Var(X_i)$.

$$\frac{Cov(X_i X_j)}{Var(X_i)} = \rho_{X_i X_j} \sqrt{\frac{Var(X_j)}{Var(X_i)}} \quad (3.25)$$

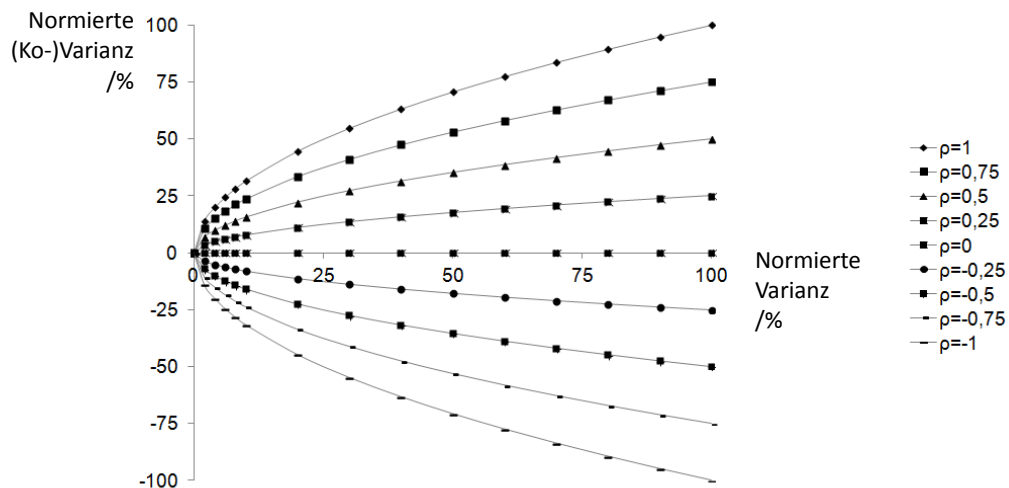


Abb. 3.12: Darstellung des Einflusses der Größe des Korrelationskoeffizienten und des Größenverhältnisses der Varianzen der betrachteten korrelierenden Größen auf die Kovarianz (mit dem Verhältnis $Var(X_j)/Var(X_i)$ auf der Abszisse und dem Verhältnis $Cov(X_i X_j)/Var(X_i)$ auf der Ordinate unter Berücksichtigung unterschiedlicher Werte des Korrelationskoeffizienten im Bereich Plus 1 bis Minus 1)

Nachdem die Abszisse das Verhältnis $Var(X_j)/Var(X_i)$ darstellt und $Var(X_i)$ den größeren Wert der Varianzen repräsentiert, besteht der mögliche Bereich der Abszisse aus den Werten zwischen 0 und 1. Im Fall von 1 sind die Werte beider Varianzen gleich. Nähert sich das Verhältnis 0, so besitzt $Var(X_j)$ im Verhältnis zu $Var(X_i)$ einen sehr kleinen Wert. Der maximal mögliche Wert für die Kovarianz wird unter der Voraussetzung der vollkommen positiven Korrelation beider Zufallsvariablen gebildet. In diesem Fall beträgt die Kovarianz exakt denselben Wert wie die Varianzen alleine. Der Korrelationskoeffizient beeinflusst in weiterer Folge das Ergebnis linear. Zwischen den beiden Extremwerten der vollkommen positiven und vollkommen negativen Korrelation regelt der ermittelte

Korrelationskoeffizient das Resultat. Von Bedeutung ist auch der Einfluss des Verhältnisses der beiden Varianzen. Unabhängig vom Korrelationskoeffizienten beeinflusst dieses Verhältnis das Ergebnis nichtlinear. Wird der Fall betrachtet, dass der Wert von Varianz $Var(X_j)$ die Hälfte des Werts von Varianz $Var(X_i)$ beträgt, dann beträgt das Ergebnis der Kovarianz circa 71 Prozent vom Wert, der beim gleichen Betrag von $Var(X_j)$ und $Var(X_i)$ ermittelt wird, wobei der Wert von $Var(X_i)$ als konstant angenommen wird. Der Mittelwert der beiden Varianzen beträgt in diesem Fall 75 Prozent vom Wert von Var_j . In Abbildung 3.13 wird der Verlauf des normierten Mittelwerts im Verhältnis zum Wert von Var_i im Vergleich zum Verlauf der normierten Kovarianz im Verhältnis zum Wert von Var_i mit konstantem Korrelationskoeffizienten dargestellt. Das Verhältnis vom variablen Wert $Var(X_j)$ zur $Var(X_i)$ wird hierbei an der Abszisse dargestellt.

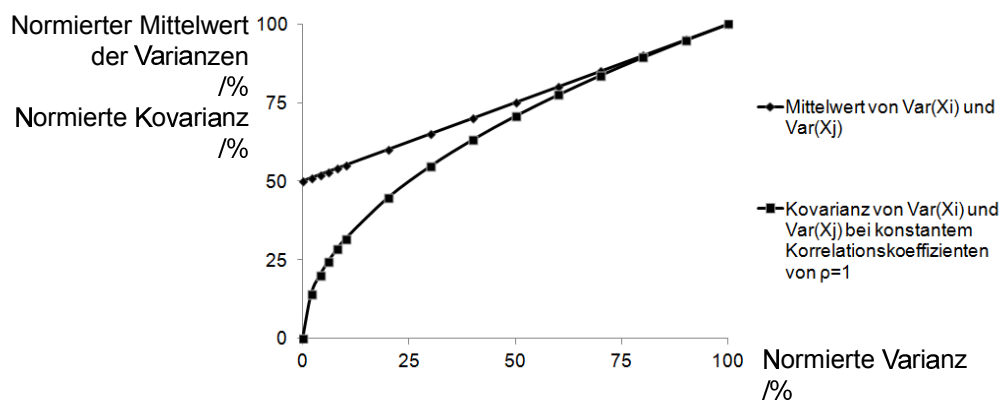


Abb. 3.13: Darstellung des prozentuellen Einflusses des Größenverhältnisses der Varianzen der betrachteten korrelierenden Größen auf die Kovarianz und den Mittelwert der Varianzen unter der Annahme eines konstanten Korrelationskoeffizienten mit Wert 1 (mit dem Verhältnis $Var(X_j)/Var(X_i)$ auf der Abszisse und prozentuellem Einfluss auf die Kovarianz und den Mittelwert auf der Ordinate)

Die Kovarianz nimmt bei Vergrößerung des Verhältnisses von den Werten der Varianzen der Zufallsvariablen schneller ab, als der Mittelwert der Varianzen. Das bedeutet für die Interpretation der Kovarianzmatrix, dass Kovarianzen von Zufallsvariablen mit starken Unterschieden in den Werten der Varianzen in das Gesamtergebnis weniger stark eingehen. Je stärker die Unterschiede der Varianzen sind, desto weniger tragen die Kovarianzen zum Gesamtergebnis bei. Diese Erkenntnis wird bei der Interpretation der Ergebnisse in den folgenden Schritten von Wichtigkeit sein. Zusammengefasst kann festgehalten werden: Je höher die Varianzen, je höher der Korrelationskoeffizient und je ähnlicher die Werte der Varianzen sind, desto mehr trägt die Kovarianz zum Gesamtergebnis bei. Hierbei darf nicht vernachlässigt werden, dass die Kovarianzen immer zweimal in der Kovarianzmatrix vorkommen. Sie betrifft sowohl die Kovarianz von der Zufallsvariablen X_i zu X_j , als auch die Kovarianz von der Zufallsvariablen X_j zu X_i . Im ersten Extremfall, bei dem beide Varianzen gleich sind und der Korrelationskoeffizient mit 1 ermittelt wurde, beinhaltet die Kovarianzmatrix an vier Stellen dieselbe Varianz. Tritt der zweite Extrem-

fall auf, bei dem beide Varianzen zwar gleich sind, jedoch der Korrelationskoeffizient mit Minus 1 beziffert wird, so beinhaltet die Kovarianzmatrix zu beiden Varianzen 2 negative Kovarianzen mit demselben Wert.

Folgendes Vorgehen zum Vergleich der Kovarianzmatrixeinträge kann definiert werden. Zuerst wird analysiert, welche Varianz den höchsten Wert besitzt. Im nächsten Schritt werden alle anderen Varianzen ins Verhältnis zur größten Varianz gesetzt und die Kovarianzen mit Gleichung 3.25 ausgedrückt. Die resultierenden Werte können in der Abbildung 3.12 dargestellt werden. Ebenso besteht die Möglichkeit, alle Varianzverhältnisse, bezogen auf die größte Varianz, in dieser Matrix einzutragen. Sie liegen dann auf der Linie des Korrelationskoeffizienten gleich 1.

Aggregation der modellierten Einzelvarianzen zur Gesamtvarianz

Mit allen Inhalten der Kovarianzmatrix kann die Varianz der Summe aller Dimensionierungsgrößen Dim_n nach folgender Gleichung gebildet werden (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 38)):

$$Var\left(\sum_{i=1}^n Dim_i\right) = \sum_{i=1}^n Var(Dim_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Cov(Dim_i Dim_j) \quad (3.26)$$

Die Varianz der Summe aller Zufallsvariablen wird als Summe aller Inhalte der Kovarianzmatrix gebildet. Jetzt verdeutlicht sich auch die Betrachtung der zwei Extremszenarien. Korrelieren zwei Varianzen von gleicher Höhe vollkommen positiv, so verdoppeln sich die Varianzen in der Summe durch die Kovarianzen in ihrem Wert. Im Falle der vollkommen negativen Korrelation von zwei Zufallsvariablen mit Varianzen von gleichem Wert, reduzieren die Kovarianzen die Summe in Beziehung auf diese zwei Zufallsvariablen auf 0. Diese Extremwerte werden in Realität kaum verwendet werden, da zwei vollkommen korrelierende Zufallsvariablen sehr einfach auf eine gemeinsame Variable zusammengefasst werden kann. Interessant sind in der Praxis die Fälle, die keinen Extremwert beschreiben. Eine sehr wichtige Aussage besteht jedoch darin, dass die Kovarianzen 0 sind, wenn keine Korrelationen festgestellt werden können. Die Gleichung von Bienamyé beschreibt den Fall, dass im gesamten Modell keine Korrelationen festgestellt werden können (vgl. Hartung & Elpelt (2007, S. 38)).

$$Var\left(\sum_{i=1}^n Dim_i\right) = \sum_{i=1}^n Var(Dim_i) \quad (3.27)$$

Gerade bei der Dimensionierung von Fabriken in den unterschiedlichen, voneinander abhängigen Fertigungsabteilungen ist jedoch davon auszugehen, dass entsprechende Korrelationen feststellbar sind.

Aggregation der Einzelrisiken zum Gesamtrisiko

Die einzelnen Unsicherheiten werden unter der Verwendung von Normalverteilungen mithilfe der Expertenangabe des Erwartungswertes und der Varianz definiert. Nach der Ermittlung der Korrelationen der Größen, für die die Unsicherheiten quantifiziert sind, kann auf Basis der Gleichung 3.26 und der Matrix 3.21 die Varianz für das Gesamtergebnis ermittelt werden. Mit Gleichung 3.3 werden die Einzelkosten zu Gesamtkosten aggregiert. Mit den zwei Werten Gesamtkostenerwartungswert und Varianz für das Gesamtergebnis ist eine Normalverteilung als Beschreibung des Gesamtrisikos vollständig definiert. Das Ergebnis ist, da es von den stochastischen Variablen der Dimensionierungsgrößen beeinflusst wird, selbst eine stochastische Variable (vgl. Deutsch (2008, S. 362)). Folgende Dichtefunktion nach Gleichung 2.11 spezifiziert das Gesamtergebnis.

$$f_{\sum Dim_i}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi Var(\sum Dim_i)}} e^{-\frac{(x-E(GK))^2}{2Var(\sum Dim_i)}} \quad (3.28)$$

Analog zu den Gesamtkosten mit dem Gesamtrisiko können die Dimensionierungsgrößen zu spezifischen Auswertungen von Detailerwartungswerten und Detailrisiken aggregiert werden. Die maximale Anzahl m der Werte der Dimensionierungsgrößen einer Detailbetrachtung unterschreitet hierbei die Anzahl n aller Dimensionierungsgrößen.

$$m < n \quad (3.29)$$

In diesem Fall kann der Detailerwartungswert $E(DK)$ mithilfe der Gleichung 3.30 ermittelt werden.

$$E(DK) = E\left(\sum_i EK_i\right) = \sum_i E(EK_i) \quad (3.30)$$

Auch für die Varianz des Detailrisikos sind alle notwendigen Werte schon in der Kovarianzmatrix 3.21 vorhanden. Basierend auf diesen Werten werden jene Werte entnommen, die mit den spezifisch betrachteten Dimensionierungsgrößen Dim_i in Zusammenhang stehen und eine Detailkovarianzmatrix 3.31 kann aufgebaut werden. Von allen in der Detailbetrachtung inkludierten Dimensionierungsgrößen werden hierfür die Varianzen übernommen und zusätzlich die Kovarianzen, die für die betrachtete Gruppe der Dimensionierungsgrößen paarweise ermittelt wurden. Diese Detailkovarianzmatrix bietet die Basis für die Detailvarianz analog der Gleichung 3.26. Aus Platzgründen wird Dim wieder mit D in der Matrix abgekürzt.

$$\mathbf{MCov}(D) = \begin{pmatrix} \text{Var}(D_1) & \cdots & \rho_{D_1 D_m} \sqrt{\text{Var}(D_1)\text{Var}(D_m)} \\ \rho_{D_2 D_1} \sqrt{\text{Var}(D_2)\text{Var}(D_1)} & \cdots & \rho_{D_2 D_m} \sqrt{\text{Var}(D_2)\text{Var}(D_m)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{D_m D_1} \sqrt{\text{Var}(D_m)\text{Var}(D_1)} & \cdots & \text{Var}(D_m) \end{pmatrix} \quad (3.31)$$

Basierend auf der Detailkovarianzmatrix wird die Varianz der Summe aller m Dimensionierungsgrößen mit folgender Gleichung ermittelt.

$$\text{Var}_{GK} = \text{Var}\left(\sum_{i=1}^m \text{Dim}_i\right) = \sum_{i=1}^m \text{Var}(\text{Dim}_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^m \text{Cov}(\text{Dim}_i, \text{Dim}_j) \quad (3.32)$$

Es folgt als Resultat die Dichtefunktion der Normalverteilung für die spezifische Auswahl von m Dimensionierungsgrößen mit dem Erwartungswert $E(DK)$ und der Varianz $\text{Var}(\sum \text{Dim}_i)$.

$$f_{GK} = f_{\sum \text{Dim}_i}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \text{Var}(\sum \text{Dim}_i)}} e^{-\frac{(x-E(DK))^2}{2\text{Var}(\sum \text{Dim}_i)}} \quad (3.33)$$

Mit diesem Schritt wird ermöglicht, jede Kombination von Aggregationen der definierten Dimensionierungsgrößen zu berechnen. Es steht dem Anwender frei, jede Dimensionierungsgröße beliebig oft in verschiedenen speziellen Auswertungen zu verwenden. Jedoch muss immer von den Dimensionierungsgrößen ausgegangen werden und die aggregierten Werte können nicht für darauffolgende Aggregationen verwendet werden, da in diesem Fall die Korrelationen des aggregierten Wertes mit allen zu kombinierenden Werten erneut ermittelt werden müssen. Dies reduziert aber das Potential des Ergebnisses nicht, da ohnedies auf der grundlegenden Basis alle Aggregationsmöglichkeiten bestehen.

Theoretische Anforderungserfüllung des mathematischen Modells

Aus theoretischer Betrachtung erfüllt das mathematische Modell die Anforderungen, die an dieses gestellt werden. Wie gezeigt wird, besteht die Möglichkeit, einzelne Risiken im Zuge der Angebotslegung im Modell anhand der Dimensionierungsgrößen zu quantifizieren. Auf Basis eines Kostenmodells, das in seiner Komplexität unter Berücksichtigung der Inputwerte auf die Fabrikplanung unterschieden wird, werden Abhängigkeiten in Form von Korrelationen gebildet. Diese werden zur Aggregation der Risiken zu einem Gesamtrisiko oder spezifischen Detailrisiken herangezogen. Gleichzeitig ist eine Aggregation des Mengenbedarf an den Dimensionierungsgrößen möglich, wobei wieder eine

Bereich	Anforderung	Erläuterung
Mathematisches Modell	nachvollziehbare der Risiken	Ermittlung Eindeutige Zuordnung der Risiken zu ihren Dimensionierungsgrößen
Mathematisches Modell	quantifiziertes Gesamtrisiko	Quantifizierung über Normalverteilungen und Aggregation inkl. Korrelationen
Mathematisches Modell	quantifiziertes Detailrisiko	Quantifizierung über Normalverteilungen und Aggregation inkl. Korrelationen
Mathematisches Modell	Abbildung der Ursachen- und Wirkungszusammenhänge der Risiken	Abbildung der Korrelationen von Risiken zueinander
Mathematisches Modell	Abbildung der Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen	Ermittlung von Korrelationen zwischen den Dimensionierungsgrößen
Mathematisches Modell	Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu Gesamtkosten	Aggregationsmöglichkeit über Summenformel
Mathematisches Modell	Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu spezifischen Kostenzusammenfassungen	beliebige Aggregationsmöglichkeit über Summenformel

Tab. 3.9: Überblick über die theoretische Anforderungserfüllung im mathematischen Modell

Aggregation zu Gesamtkosten oder spezifische Detailkosten möglich ist. Durch eine umfassende Aggregationsmöglichkeit der einzelnen Kosten und Risiken, sowie durch die eindeutige Beziehung zu deren Ursprüngen bietet sich eine nachvollziehbare Analyseumgebung für den Anwender. Zusätzlich geben die Korrelationen Informationen über die Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen und bieten die Möglichkeit, Ursache- und Wirkungszusammenhänge in verschiedenen Aggregationsebenen darzustellen. In Tabelle 3.9 werden die Anforderungen an das mathematische Modell den Lösungsvorschlägen gegenübergestellt. Im Zuge der Verifikation und Validierung werden die Anforderungen anhand eines Anwendungsfalles im Detail überprüft und getestet.

3.4.3 Übersicht über die Vorgehensschritte im mathematischen Modell

Zusammengefasst besteht das Vorgehen zur Generierung eines mathematischen Modells zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanungsphase aus sieben Hauptprozessschritten, die sowohl Tätigkeiten des Planers und des Modellimplementierers als auch mathematische Operationen beinhalten.²

² Relevante Teile der Vorgehensweise wurden als Patent A 568/2014 (vgl. Unzeitig (2014)) eingereicht.

Für jede Planung von neuen Produktionen werden die Werte der Dimensionierungsgrößen anhand eines unternehmensspezifischen mathematischen Modells zur Kostenermittlung (I) berechnet. Der Planer gibt hierbei die benötigte Menge vor und die Finanzkalkulation ergänzt die Kosten je Mengeneinheit. Dies findet außerhalb der Systemgrenzen der entwickelten Methodik statt, wobei die Erwartungswerte einen Input in das mathematische Modell der Risikoanalyse darstellen.

Die nächsten drei Schritte beziehen sich auf die allgemeine Modellerstellung für das spezifische Unternehmen (II). Bei gleichartigen Produkten und Projekten im Unternehmen werden die in Kapitel 3.4.2 detailliert beschriebenen Tätigkeiten bei der Einführung durchgeführt und regelmäßig auf notwendige Anpassungen kontrolliert. Solange keine grundlegenden Veränderungen in den Abhängigkeiten festgestellt werden, gilt das Ergebnis dieser Schritte, die Korrelationsmatrix der Dimensionierungsgrößen, für alle Produkte und Projekte im Unternehmen. Für die Ermittlung dieser Korrelationsmatrix wird in der ersten Haupttätigkeit ein Kostenmodell erstellt. Basierend auf dem Kostenmodell werden mittels Monte-Carlo-Simulation Ergebnisse für die Dimensionierungsgrößen erzeugt, anhand derer die entsprechenden Pearsonschen Korrelationskoeffizienten aller Dimensionierungsgrößenpaare ermittelt werden. Die Inputwerte, die ein spezifisches Fahrzeugprojekt beschreiben, variieren dabei in einem Bereich, dessen Grenzen die betrachtete Fabrik definiert. Diese Korrelationskoeffizienten werden in einer allgemeinen Korrelationsmatrix zusammengefasst, die eine Kovarianzmatrix für die Varianzaggregation unter Berücksichtigung von Diversifikationseffekten vorbereitet.

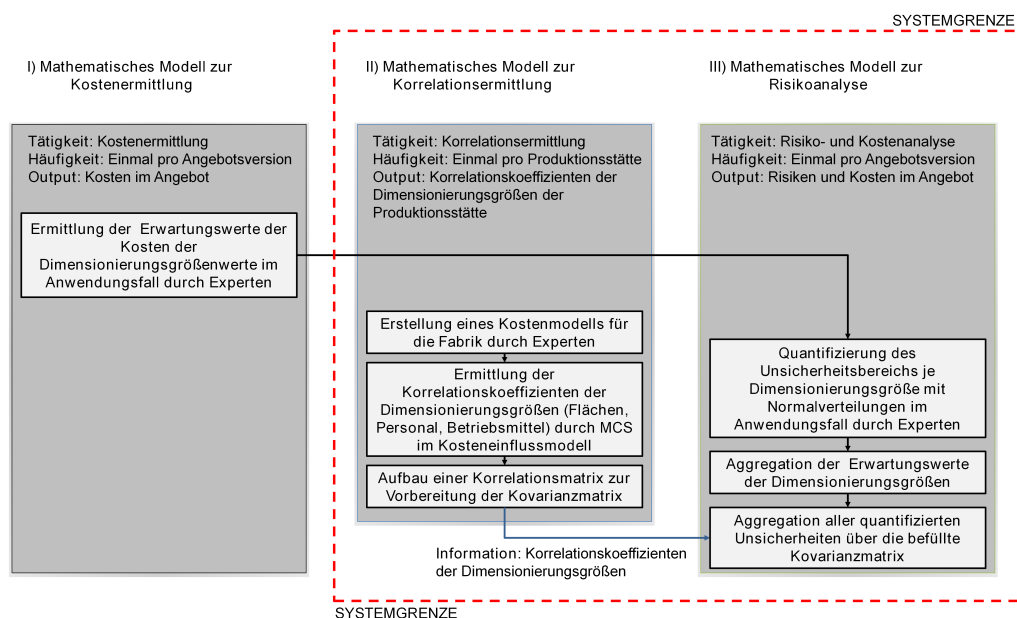


Abb. 3.14: Darstellung der Hauptprozessschritte zur Quantifizierung und Aggregation der Unsicherheiten der Dimensionierungsgrößen im Zuge der frühen Fabrikplanung

Im Zuge der Tätigkeiten im mathematischen Modell zur Risikoanalyse (III) quantifiziert

der Planer zunächst die Unsicherheitsbereiche je Dimensionierungsgröße. Es wird eine Normalverteilung innerhalb des spezifizierten Bereiches mit dem Dimensionierungsgrößenwert als Mittelwert angenommen. Als Output existieren der Erwartungswert sowie die Varianz beziehungsweise Standardabweichung für jede Dimensionierungsgröße.

Da alle Dimensionierungsgrößen im mathematischen Modell zur Kostenermittlung (I) in einer gemeinsamen Währungseinheit vorliegen, können der Gesamterwartungswert und auch Detailerwartungswerte über eine Summenformel analog den Rechenregeln der multivariaten Statistik bei Normalverteilungen aggregiert werden. Unter Zusammenführung der Korrelationsmatrix und der Varianzen der einzelnen Dimensionierungsgrößen kann eine Kovarianzmatrix für den spezifischen Anwendungsfall gebildet werden. Die Gesamtvarianz der Fabrikdimensionierung wird ebenfalls mittels Summenformel der multivariaten Statistik bei Normalverteilungen analytisch gelöst. Wie bei der Aggregation vom Erwartungswert ermöglicht das mathematische Modell mit den vorhandenen Informationen sowohl die Aggregation der Gesamtvarianz als auch der Detailvarianzen.

3.4.4 Analyse des betrachteten Risikos

Mit den bisher beschriebenen Schritten wird für die Fabrikplanung die Möglichkeit geschaffen, die auftretenden Unsicherheiten zu quantifizieren. Durch diese Quantifizierung bietet sich Potential für vielfältige Analysemöglichkeiten. Diese können in Analysen hinsichtlich des Gesamtrisikos und hinsichtlich der Detailrisiken eingeteilt werden und unterstützen maßgeblich die Anforderungserfüllung hinsichtlich der hier vorgestellten Methodik zur Quantifizierung der Unsicherheiten im Zuge der frühen Phase der Fabrikplanung.

Analyse des Gesamtrisikos

Als Basis zur Analyse des Gesamtrisikos stehen die Anforderungen im Mittelpunkt, das Gesamtrisiko möglichst transparent darzustellen und den Entscheidungsträger bei der Preisfindung zu unterstützen. Eine aggregierte Summierung der quantifizierten Unsicherheiten bietet dem Entscheider die Möglichkeit, Informationen über das Risiko für jede Preisbildung zu erhalten und gegebenenfalls entsprechende Risikostrategien abzuleiten.

Der Output der Risikoaggregation in der vorgestellten Methodik besteht aus einer Normalverteilung mit einem Gesamterwartungswert und einer Gesamtstandardabweichung (vgl. Gleichung 3.3 und 3.26). Dieses Ergebnis kann mittels einer Dichtefunktion dargestellt werden, wobei die Abszisse die Ausprägungen in der gewählten Währung definiert und die Ordinate die Häufigkeit des Auftretens spezifiziert, wie in Abbildung 3.15 gezeigt wird. Mit den Informationen in der Normalverteilung nach Gleichung 3.33 kann für jeden Wert ermittelt werden, mit wieviel Prozent Wahrscheinlichkeit β die tatsächlichen Kosten die ermittelten übersteigen werden. Zur Berechnung dieser Information dient das α -Quantil

nach folgender Gleichung, die für stetige Verteilungen angewendet werden kann (vgl. Hartung (2009, S. 114)):

$$F_{GK}(\xi_\alpha) = \int_{-\infty}^{\xi_\alpha} f_{GK}(x) dx = \alpha \quad (3.34)$$

Der Wert α gibt den Flächeninhalt unter der Normalverteilungsfunktion, ausgehend von minus unendlich bis zum definierten Wert ξ_α , an. Der maximale Flächeninhalt unter dieser Kurve tritt im Falle einer Definition von ξ_α mit plus unendlich auf und ist per Definition 1. Der Wert α spezifiziert die Wahrscheinlichkeit, mit der die tatsächlichen Kosten laut Planung unter dem gewählten Preis liegen werden. Für die Berechnung des Prozentsatzes β von ξ_α bis plus unendlich kann Gleichung 3.34 umgeformt werden:

$$\beta = 1 - \alpha = 1 - F_{GK}(\xi_\alpha) = 1 - \int_{-\infty}^{\xi_\alpha} f_{GK}(x) dx \quad (3.35)$$

Der Bereich β gibt hiermit die Wahrscheinlichkeit in Prozent wieder, dass ein Wert größer als ξ_α eintritt. Für die Anwendung im Zuge der Fabrikplanung können diese Formeln direkt eingesetzt werden. Zum einen kann für jeden beliebigen Gesamtwert die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden, dass dieser Wert überschritten beziehungsweise unterschritten wird. Gerade bei Verhandlungen von Angebotswerten wird dem Verhandlungsführer ein Werkzeug zur Verfügung gestellt, mit dem er für jeden Verhandlungswert das Risiko ermitteln und entscheiden kann, ob er dieses Risiko in Kauf nimmt. Zum anderen kann ein Überblick über die unterschiedlichen Risikobereiche mit einer schrittweisen Abstufung tabellarisch dargestellt werden.

In Abbildung 3.15 wird ein fiktives Beispiel eines Angebotspreises gezeigt, für den die Verteilung der Gesamtkosten mittels Normalverteilung dargestellt wird. Der Erwartungswert wird hierbei mit 140,00 Mio. € angenommen und die Standardabweichung mit 8,40 Mio. €.

In Tabelle 3.10 werden dann die Risikobereiche des fiktiven Beispiels mit für den Anwender ausgewählten Abstufungen und die Wahrscheinlichkeit für den gewählten Wert dargestellt.

Je höher die Wahrscheinlichkeit wird, dass die tatsächlichen Kosten den verhandelten Preis übersteigen, desto höher wird das Risiko, welches das Unternehmen im spezifischen Fall zu tragen hat. In der Tabellenübersicht fällt auf, dass die Erhöhung des Risikos im Randbereich der Verteilungskurve zu deutlichen Preisreduktionen führen kann. Nachdem die Wahrscheinlichkeit von 0 Prozent im Unendlichen liegt, beginnt diese Tabelle bei einem Prozent des β -Bereichs beziehungsweise bei 99 Prozent des α -Bereichs, folglich mit einem Prozent Risiko. Bei einer Erhöhung des Risikos von einem Prozent auf zehn Prozent kann der Preis im Beispiel um 8,8 Mio. € reduziert werden. Dies entspricht einer

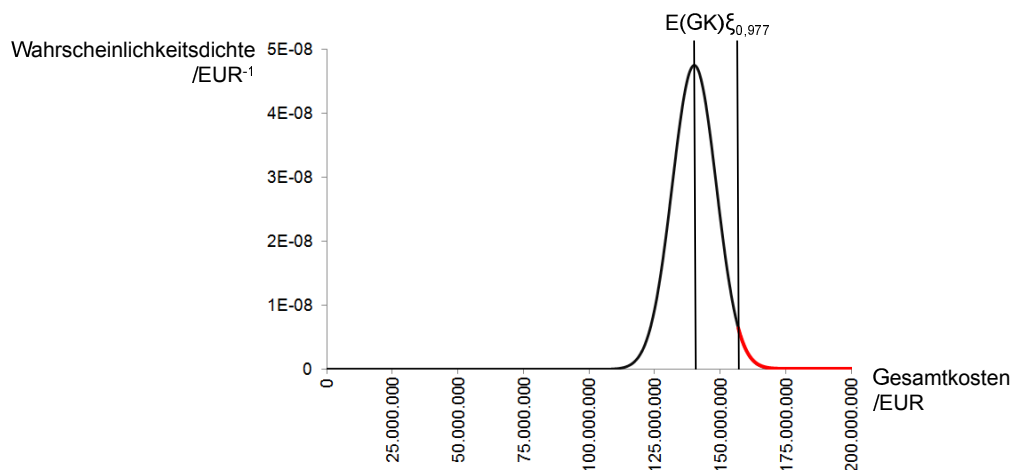


Abb. 3.15: Darstellung der Verteilung der Gesamtkosten eines Angebotspreises mit dem Erwartungswert $E(GK)$ und dem Wert des Quantils $\xi_{0,977}$ anhand eines fiktiven Beispiels

Preisminderung um rund 5,5 Prozent. Bei einer zusätzlichen Erhöhung um zehn Prozent reduziert sich der Preis nur noch um rund 2,3 Prozent vom Ausgangswert. Bei einer weiteren Inkaufnahme von zusätzlich zehn Prozent Risiko, kann der Preis nur noch um rund 1,7 Prozent vermindert werden. Dies lässt sich in ähnlicher Weise bis zum Risiko von 50 Prozent fortsetzen. Auslöser dieser Nichtlinearität ist die Glockenkurvengeometrie der Normalverteilung. Eine erste Aussage aus der Methodik im ganz allgemeinen Fall lässt sich formulieren: Im Bereich des niedrigen Risikos auf der rechten Seite der Wahrscheinlichkeitskurve kann der Preis bei moderatem Risikoanstieg deutlich reduziert werden. Je näher sich der verhandelte Preis am Erwartungswert orientiert, desto mehr steigt das Risiko bei Preisreduktionen.

In Abbildung 3.16 wird dieser Effekt an einem fiktiven Beispiel dargestellt. Hierbei kann die Glockenkurvengeometrie in umgekehrter Form erkannt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass mit einer Normalverteilung der Zustand von 0 Prozent Risiko nur im Unendlichen erreicht wird, weshalb in der Grafik nicht mit 0 sondern mit einem Prozent Risiko begonnen wird. Bis auf die Randbereiche werden die Risikodifferenzen in Schritten von zehn Prozent dargestellt. Die Gesamtsumme des Preisänderungspotentials ergibt also die Risikoerhöhung von einem Prozent auf 99 Prozent. In Summe ergibt dies eine Preisänderung von rund 24,5 Prozent Preisreduktion vom Wert mit einem Prozent Risiko (vgl. auch Abbildung 3.17).

Der Wert der prozentuellen Preisreduktion hängt vom Erwartungswert sowie von der Standardverteilung ab. Je größer der Erwartungswert und je kleiner die Standardabweichung, desto geringere Chancen bestehen, den Preis bei einer moderaten Steigerung des Risikos zu senken. Das Risiko wird definiert mit dem Flächeninhalt der Gaußschen Glockenkurve, diese ist im Fall einer kleinen Standardabweichung im Verhältnis zum Erwar-

Größe	Wert	
Erwartungswert $E(GK)$	140,00 Mio. €	
Standardabweichung σ	8,40 Mio. €	
Wahrscheinlichkeitsbereich α	Wahrscheinlichkeitsbereich β	Wert ξ_α
Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens	Wahrscheinlichkeit des Überschreitens	VaR bei α
99 %	1 %	159,54 Mio. €
95 %	5 %	153,82 Mio. €
90 %	10 %	150,77 Mio. €
85 %	15 %	148,71 Mio. €
80 %	20 %	147,07 Mio. €
75 %	25 %	145,67 Mio. €
70 %	30 %	144,40 Mio. €
Wahrscheinlichkeitsbereich α	Wahrscheinlichkeitsbereich β	gewählter Wert ξ_α
97,7 %	2,3 %	156,80 Mio. €

Tab. 3.10: Überblick über die Risikobereiche eines fiktiven Angebotswertes

tiongswert auf einen sehr kleinen Raum beschränkt. Eine Auswertung des Verhältnisses Erwartungswert zu Standardabweichung im Bezug auf das Potential zur Preisreduktion bei einem Anstieg des Risikos von einem Prozent auf 10 bis 50 Prozent wird in Abbildung 3.18 schrittweise dargestellt, wobei für jede Berechnung der Preisreduktion der Wert mit einem Prozent Risiko ($Preis_{99\%}$) als Basis herangezogen wird. Auf der Abszisse wird dabei das Verhältnis des Erwartungswertes zur Standardabweichung aufgetragen. Jede Linie beinhaltet die Preisreduktionspotentiale in Abhängigkeit von diesem Verhältnis.

Beim Vergleich der Kurven wird deutlich, dass das größte Preisreduktionspotential in den äußeren Randbereichen der Glockenkurve liegt. Je näher man sich dem Erwartungswert nähert, desto geringer fällt dieses Potential aus, oder in anderen Worten, desto geringere Auswirkungen hat eine konstante Risikoerhöhung auf die Preisreduktion. Da die Differenz der Kurven bei steigender Höhe des Verhältnisses des Erwartungswertes zur Standardabweichung abnimmt, fällt auch das Preisreduktionspotential immer geringer aus. Auch wenn ein geringeres Potential zur Preisreduktion in Bezug auf eine Risikoerhöhung bei engen Kurven vorherrscht, erleichtern diese in der Praxis die Preisfindung, da bei gleichem Erwartungswert der Preis viel länger im Risikobereich mit einem Risiko von mehr als einem Prozent liegt. Führt die Preisverhandlung jedoch in den Bereich der Risikoquantifizierung mit der Gaußschen Glockenkurve, steigt das Risiko sehr rasch an.

Je geringer das Verhältnis von Erwartungswert zu Standardabweichung ausfällt, desto größeren Einfluss besitzt die Risikoerhöhung. Im Bereich der Gaußschen Glockenkurve können Extremfälle dazu führen, dass die Preise um mehr als 100 Prozent reduziert werden. Dies muss in der Praxis ausgeschlossen werden, da ein negativer Preis der

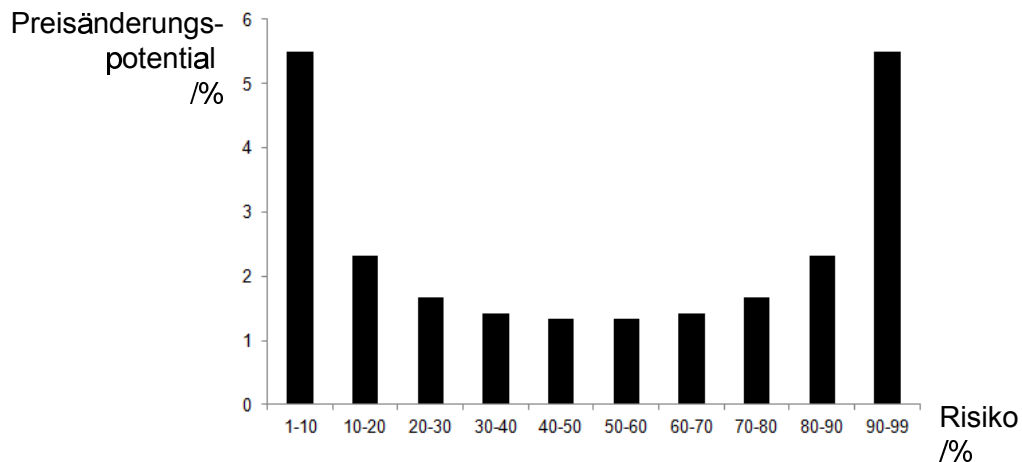


Abb. 3.16: Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikoerhöhung am fiktiven Beispiel mit dem Erwartungswert von 140,00 Mio. € und der Standardabweichung von 8,40 Mio. €

höchsten Wirtschaftlichkeit, eines der Hauptziele der Fabrik, widerspricht (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. V)).

Vielfach wird in der Literatur und Praxis das Maß Value-at-Risk (VaR) definiert, das auf dem α -Quantil der Verteilung der Gesamtkosten basiert (vgl. Wolke (2013), Deutsch (2008) und Dowd (1998)). Der VaR bietet Vorteile, wenn im Unternehmen Kennzahlen gesucht werden, die keinen prozentuellen Wert der Risikowahrscheinlichkeit, sondern einen definitiven Wert in Form einer Währung beinhalten. Dieser Wert bietet somit die Grundlage, um für einen verhandelten Preis auf Basis der berechneten Kostenverteilung ein spezifisches Risiko berechnen zu können. Hierfür wird ein α -Quantil definiert, wobei dieses den Risikowert an sich beschreibt.

Wird im fiktiven Beispiel der VaR beim 0,99-Quantil ermittelt, ergibt dieser den Wert 159,54 Mio. €, der mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von einem Prozent überschritten wird. In Tabelle 3.11 wird der Verhandlungswert mit 155,00 Mio. € definiert. In diesem Fall werden eine Wahrscheinlichkeit von 96,29 Prozent ermittelt, diesen Wert zu unterschreiten. Es verbleiben also 3,71 Prozent Risiko, dass die Kosten den Verhandlungswert überschreiten. In Abbildung 3.19 werden die Werte und Bereiche für dieses Beispiel eingezeichnet.

Die hiermit gewonnenen Informationen über das gesamt betrachtete Risiko und den Wert Value-at-Risk dienen als Grundlage zur Anwendung von Risikostrategien und Vorgehensweisen, die mittels des Risikomanagements etabliert sind (vgl. Kapitel 2.5). Gerade die quantifizierten Werte können zu einer Definition von Schwellwerten, wie der Warnschwelle und Alarmschwelle, dienen (vgl. Kaiser & Köhne (2007, S. 111)). Die Überschreitung der Schwellwerte führt dann zur Anwendung der im Risikomanagement definierten grundlegenden Strategien, die jedoch in dieser Methodik nicht mehr betrachtet werden. In Ka-

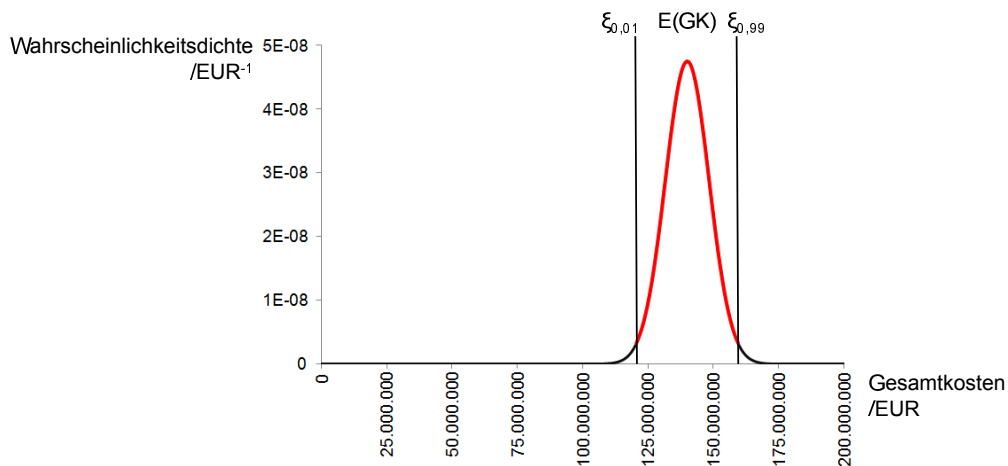


Abb. 3.17: Darstellung der Verteilung der Gesamtkosten eines Angebotspreises mit dem Erwartungswert $E(GK)$ und den Werten des Quantils $\xi_{0,01}$ und $\xi_{0,99}$ an einem fiktiven Beispiel

Größe	Wert
Erwartungswert $E(GK)$	140,00 Mio. €
Standardabweichung σ	8,40 Mio. €
VaR bei $\xi_{0,99}$	159,54 Mio. €
Beispiel A: Verhandlungspreis P_A	155,00 Mio. €
Wahrscheinlichkeit, dass Kosten eintreten, die niedriger als P_A sind	rund 96,29 %
Wahrscheinlichkeit, dass Kosten eintreten, die höher als P_A sind	rund 3,71 %

Tab. 3.11: Ermittlung des VaR an einem fiktiven Beispiel

pitel 5 werden die Auswirkungen der Korrelationen der Dimensionierungsgrößen auf das Gesamtrisiko und den VaR an einem konkreten Anwendungsbeispiel dargestellt.

Analyse der Detailrisiken

Mithilfe der Korrelationsmatrix und der quantifizierten Unsicherheiten können variable Details der Risiken analysiert werden. Ausgehend vom Gesamtrisiko unterstützt diese Möglichkeit die Determination der Hauptrisikofaktoren auf verschiedenen Aggregationsebenen und bietet somit die Voraussetzung für die Anwendung von geeigneten Risikostrategien für spezifische Herausforderungen. Die Analysemöglichkeiten bestehen aus drei verschiedenen Schritten. Generell steht die Anforderung im Vordergrund, sowohl Transparenz hinsichtlich der Detailrisiken als auch eine Analysemöglichkeit hinsichtlich der Risikohauptinflussfaktoren zu schaffen. Zur Unterstützung der Transparenz wird mit ver-

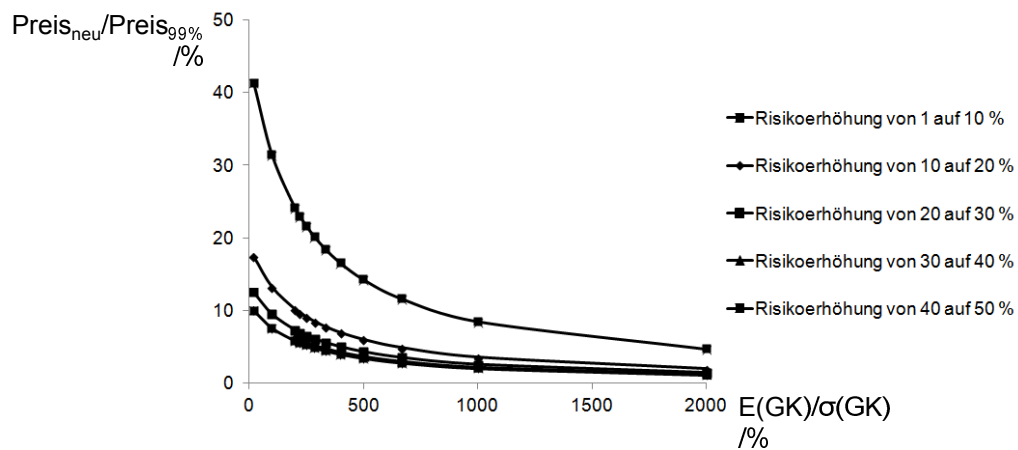


Abb. 3.18: Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikoerhöhung im allgemeinen Fall anhand des Verhältnisses Erwartungswert $E(GK)$ zu Standardabweichung $\sigma(GK)$

schiedenen Methoden versucht, die Detailergebnisse möglichst gemeinsam, vergleichbar und aussagekräftig darzustellen. Die Größe des Einflusses auf das Gesamtrisiko steht im Vordergrund. Ein erster Überblick wird mit der gemeinsamen Darstellung der Verteilung der Detailrisiken und des Gesamtrisikos gewährleistet, wie in Abbildung 3.20 anhand eines fiktiven Beispiels mit sechs Dimensionierungsgrößen und deren Risiko gezeigt wird.

Im ersten Schritt bietet die Methodik die Grundlage für die detaillierte Betrachtung der Risiken auf unterster Ebene, auf der die Unsicherheiten quantifiziert werden. Hierfür werden die Varianzen nach ihrem Wert sortiert und diejenige mit dem größten Wert betrachtet, wie in einem fiktiven Beispiel in Abbildung 3.21 dargestellt wird. Nachdem die Gesamtvarianz aus der Summe der Varianzen und Kovarianzen besteht und die Kovarianzen in Abhängigkeit der Varianzen sind, kann anhand der Varianzen allein ein Überblick über die Haupteinflussgrößen auf das Gesamtrisiko geschaffen werden. Die Darstellung in Form des Pareto diagramms mit der stufenweisen, nach Größe geordneten Auftragung der Varianzen schafft hierbei eine Übersicht (vgl. Müller (2014, S. 94)). Eine Paretoanalyse aller Haupteinflüsse auf das Gesamtrisiko benötigt jedoch auch die Werte der Kovarianzen, die erst im nächsten Schritt analysiert werden. Erst dann ist eine in Paretoanalysen üblichen Eingrenzung auf die wichtigsten 20 Prozent der Ursachen mit den höchsten Werten im vorliegenden Anwendungsfall sinnvoll (vgl. Müller (2014, S. 94)). Die alleinige Betrachtung der Varianzen spiegelt die Risiken lediglich aufgrund der Unsicherheit je Dimensionierungsgröße die Haupthandlungspunkte für die Risikostrategien wider. Auf diese Varianzen kann direkt Einfluss genommen werden, während die Kovarianzen nur ein Ergebnis der Korrelationskoeffizienten und der beteiligten Varianzen darstellen. Für jede Varianz besteht zusätzlich die Möglichkeit, mithilfe der normierten Varianz-Kovarianzdarstellung die mit der Varianz in Verbindung stehenden Kovarianzen darzustellen.

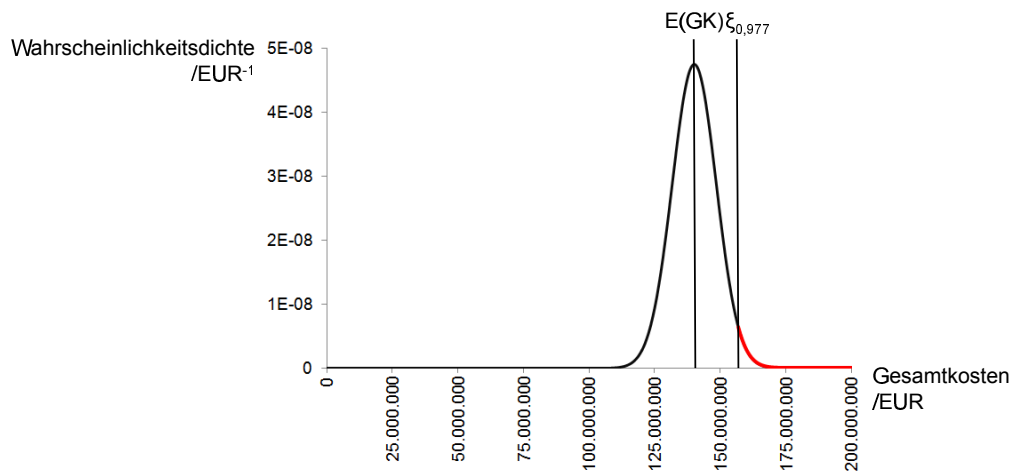


Abb. 3.19: Darstellung des VaR zur Auswertung des Risikos anhand eines fiktiven Beispiels

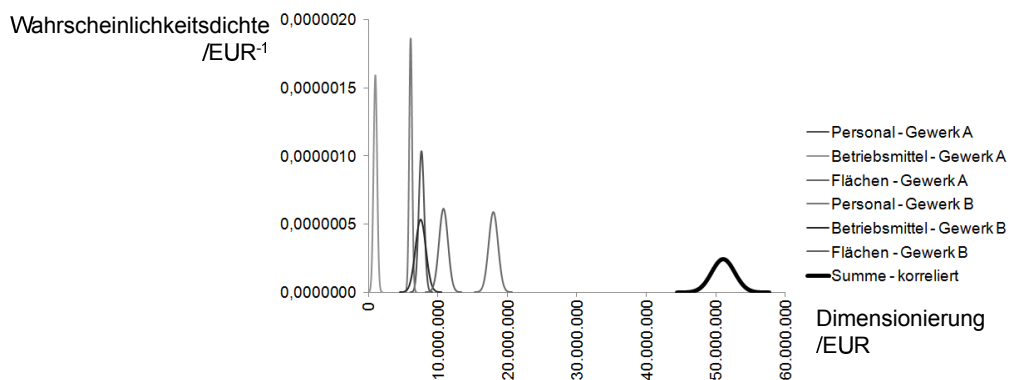


Abb. 3.20: Darstellung der Verteilung (im Intervall $\mu - 4\sigma$ bis $\mu + 4\sigma$) des Gesamtrisikos und der Detailrisiken anhand eines fiktiven Beispiels mit insgesamt sechs Dimensionsgrößen

Anhand der Kovarianzmatrix sind alle Größen für die Analyse der Varianzen sowie durch die Korrelationen verursachte Kovarianzen verfügbar. Analog zum Pareto-Diagramm bei den Varianzen kann mithilfe der Verwendung dieses Werkzeuges auch für die Kovarianzmatrix ein Überblick über die Haupteinflüsse geschaffen werden, wie in Abbildung 3.22 gezeigt wird. Jedoch basieren die Kovarianzen sowohl auf den Varianzen als auch auf der Korrelationsuntersuchung anhand des mathematischen Kostenfaktormodells, wobei sie auch negative Werte annehmen können. Die Korrelationsuntersuchung stellt eine statistische Untersuchung dar, die von der Auswahl der Werte im spezifischen Angebot unabhängig ist. Es besteht somit nur Einflussmöglichkeit auf die Varianzen. Dennoch ist ein Wissen über die Korrelationen der Varianzen von entscheidender Bedeutung, da diese nicht nur in den Varianzen sondern auch in den betroffenen Kovarianzen Wirkung zeigen. Ereignisse mit relativ kleinen Auswirkungen auf eine Dimensionierungsgröße können bei

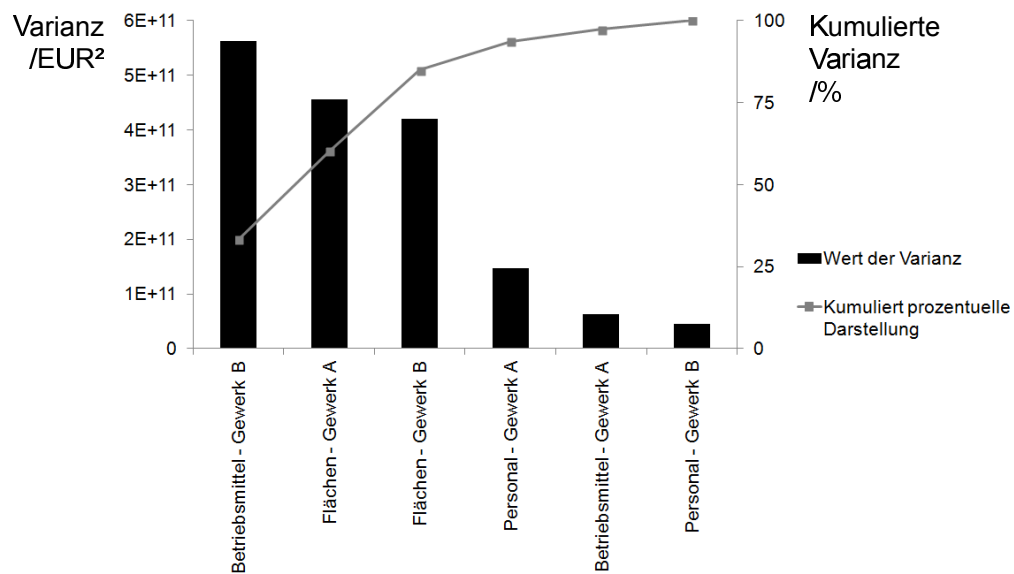


Abb. 3.21: Auswertung der Varianzen anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels

starken Korrelationen maßgeblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis nehmen (vgl. The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b, S. 53)). In diesem Fall müssen die Effekte übergreifend betrachtet werden. Die unabhängige Analyse der Korrelationsfaktoren bietet generell Informationen über die Abhängigkeiten der Risiken und somit über ihre Diversifikationseffekte, wie in Abbildung 3.23 ersichtlich ist. Positive Korrelationen verstärken das Gesamtrisiko im Vergleich zu Korrelationen mit dem Wert 0, während negative es vermindern.

Ein Überblick über alle Kovarianzen, die mit einer Dimensionierungsgröße in Verbindung stehen, wird mit der normierten Varianz-Kovarianzdarstellung gewährt, wie in Abbildung 3.24 als fiktives Beispiel ersichtlich ist. Hierbei werden alle mit einer bestimmten Dimensionierungsgröße in Verbindung stehenden Varianzen und Kovarianzen in einem Diagramm und anhand der Varianz der Dimensionierungsgröße normiert dargestellt. Im vorliegenden Fall existieren sechs Werte, wobei an der Stelle (1/1) die Varianz der Dimensionierungsgröße ersichtlich ist. Diese besitzt im vorliegenden Fall den größten Wert. Zusätzlich sind alle Varianzen im diesem Fall kleiner als die Varianz der Dimensionierungsgröße, weshalb das Diagramm auf der Abszisse bei 1 endet. Der zweitgrößte Wert befindet sich in diesem Fall beim kleinsten Verhältnis von Varianz zur Varianz der betrachteten Dimensionierungsgröße. Für dieses Verhältnis wurde die höchste Korrelation mit circa 0,28 ermittelt.

Zusätzlich können diverse Aggregationen der Risiken zu Detailauswertungen durchgeführt werden. Beispielhaft sei die Möglichkeit zur Zusammenfassung aller gleichen Dimensionierungsgrößen über alle beteiligten Abteilungen hinweg, beziehungsweise die Zusammenfassung der Werte aller Dimensionierungsgrößen (Betriebsmittel, Personal

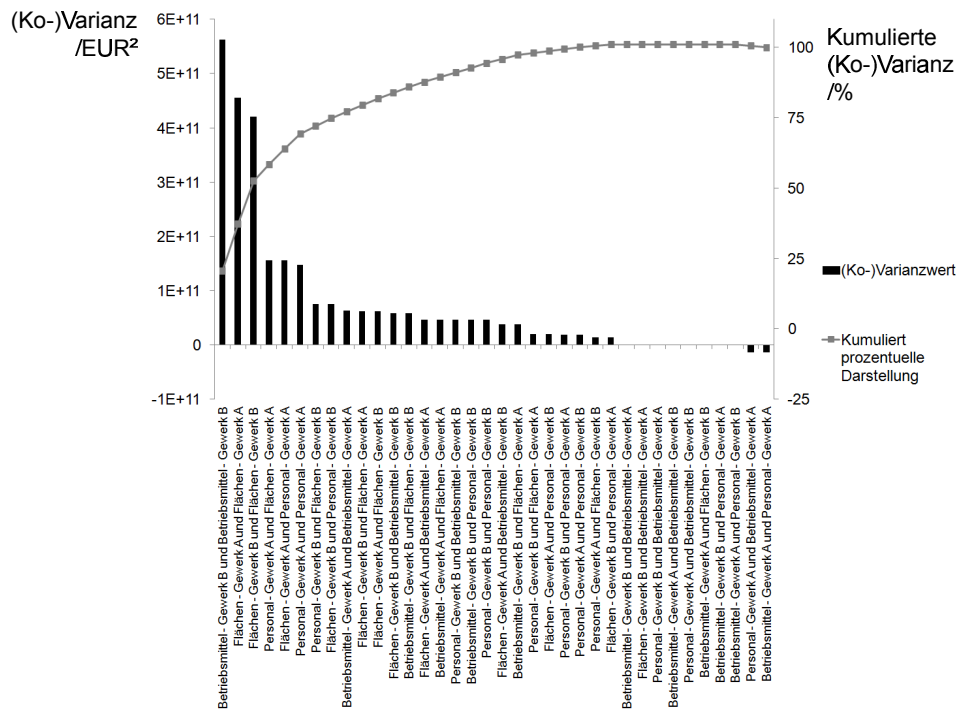


Abb. 3.22: Auswertung der Kovarianzen anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels

und Flächen) einer Abteilung zu einem Wert, erwähnt.

Zum Gesamtrisiko in Form der Gesamtvarianz tragen die Kovarianzen einen entscheidenden Wert bei. Neben dem Einfluss durch die Varianzen, die in der Kovarianzermittlung eine Rolle spielen, können auch die Korrelationskoeffizienten einer detaillierten Untersuchung unterzogen werden. Der Korrelationskoeffizient basiert auf den Zufallszahlen, die auf Basis des Kostenmodells erzeugt werden, wobei sowohl die Inputwerte als auch die Einflussfaktoren in einem definierten Bereich variiert werden. Diese beiden Einflüsse auf den Korrelationskoeffizienten können gemeinsam analysiert werden. Es besitzen diejenigen Inputwerte den größten Einfluss auf die Korrelation der Dimensionierungsgrößen, die auch diese selbst am stärksten beeinflussen.

Mit den vielfältigen Analysemöglichkeiten können Vergleiche zu Referenzdaten und zu verschiedenen Daten der Planungsalternativen im Zuge der jeweiligen Angebotslegung getroffen werden. Über den Vergleich wird die Auswahl der Alternative mit dem geringsten Risiko und dem geringsten Erwartungswert unterstützt.

Übersicht über die Vorgehensschritte der Risikoanalyse

Der Analyseprozess anhand der quantifizierten Unsicherheiten und aggregierten Risiken kann in 6 Schritte aufgeteilt werden, wie in Abbildung 3.25 dargestellt wird. Die ersten beiden Schritte beinhalten die Analyse des Gesamtrisikos, basierend auf dem α -Quantil

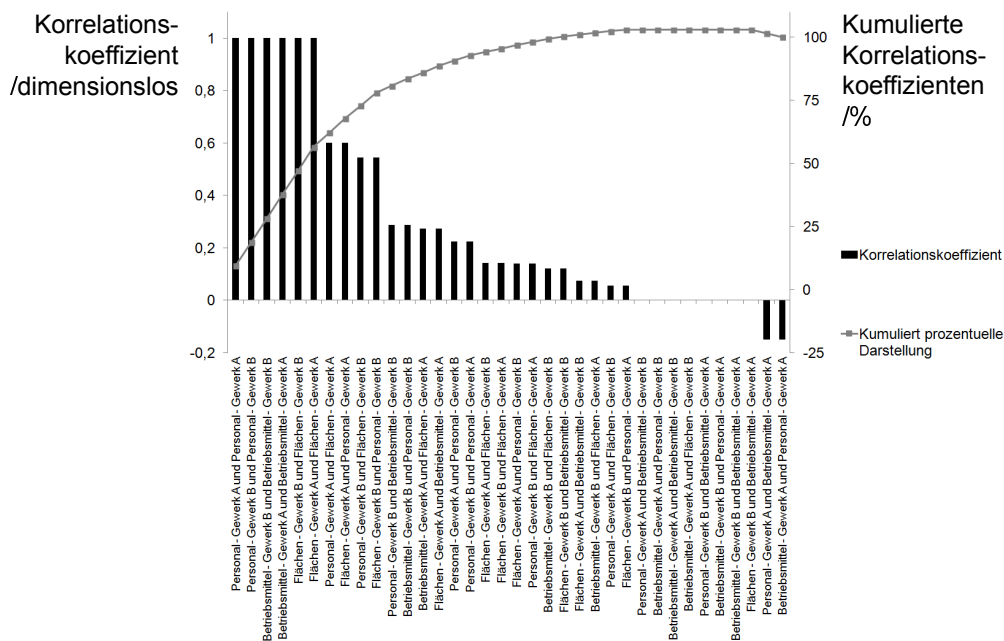


Abb. 3.23: Auswertung der Korrelationskoeffizienten anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels

und dem Value-at-Risk. Darauf folgt eine umfangreiche Detailanalyse mit verschiedenen Möglichkeiten der Informationsgewinnung. Diese führt von einer Analyse der Varianzen und einem Überblick über die Korrelationskoeffizienten bis zur Darstellung der Kovarianzen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, spezifische Aggregationsebenen für die jeweilige Anwendung zu schaffen.

Möglichkeiten zur Risikoreduzierung

Neben dem Wissen für den Entscheidungsträger über das zu treffende Risiko bei Preisentscheidungen und die Hauptauslöser des Risikos im jeweiligen Anwendungsfall kann die Notwendigkeit bestehen, das Risiko auch aufgrund der gewonnenen Information zu reduzieren. Dieses Vorgehen basiert auf der Risikostrategie des Verminderns. Hierfür bietet die vorgestellte Methodik mehrere Hebel.

Ein Hebel besteht in der Varianz. Die Varianzen werden durch die Experten der Fabrikplanung für den jeweiligen Anwendungsfall geschätzt. Mit diesen Experten kann direkt erhoben werden, welche Informationen sie benötigen, um den Wert der Varianzen, welche die Unsicherheiten beschreiben, zu reduzieren. Generell werden hierbei zwei Fälle unterschieden. Zum einen existieren die Unsicherheiten der Produkt- und Produktionsinformationen, die mit dem Auftraggeber direkt abgestimmt werden. Hierbei ist die Frage zu klären, ob die definierten Unsicherheiten eingengt werden und somit mit einer Varianz von kleinerem Wert beschrieben werden können. Diese Varianz besitzt somit nicht nur

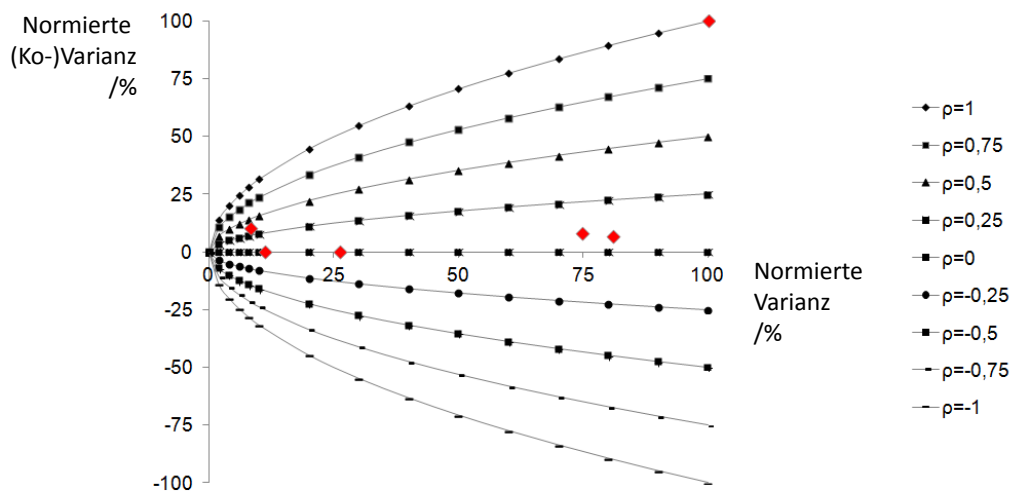


Abb. 3.24: Darstellung der normierten Varianz-Kovarianzmatrix mit allen Kovarianzen, die mit einer spezifischen Dimensionierungsgröße in Verbindung stehen, anhand eines fiktiven Beispiels

Einfluss auf die Varianz an sich, sondern auch auf die Kovarianzen, die mit der Dimensionierungsgröße in Beziehung stehen. Zum anderen existieren Unsicherheiten hinsichtlich der Prozess- und Ressourceninformationen. Bei diesen besteht unternehmensintern das Potential, durch erhöhten Planungsaufwand die Unsicherheiten zu reduzieren. An dieser Stelle ist eine Kosten- und Nutzenanalyse der erhöhten Planungsaufwände in der frühen Fabrikplanung erforderlich.

In den Schritten A und B der Erstellung eines Kostenmodells, die im Gegensatz zu Schritt C ein unternehmensübergreifendes Modell für die Einflüsse auf die Kosten bilden, werden Vernachlässigungen hinsichtlich des konkreten Anwendungsfalls mit Rücksicht auf einen effizienten Einsatz des Modells getroffen. Im Zuge der Paretoanalyse der Korrelationseinflussgrößen werden die Inputwerte in Kombination mit den Einflussgrößen ermittelt, die die größte Auswirkung auf die Korrelationskoeffizienten haben. Auch hier besteht eine Möglichkeit zur Reduzierung. Können die Bereiche der Inputwerte, die die stärksten Einflüsse auf die Korrelationen besitzen, aufgrund spezifischer Informationen entschieden reduziert werden, verringert sich auch der Wert der Korrelationskoeffizienten und somit in weiterer Folge der mit diesen in Verbindung stehenden Kovarianzen. Der Grund, der hinter dieser Verminderung liegt, ist die steigende Einwirkung der Inputfaktoren, die nur vereinzelt auf die Dimensionierungsgrößen Einfluss nehmen, auf deren Verteilung. Überwiegen die Unsicherheiten der Inputfaktoren, die nur mit einer der beiden Dimensionierungsgrößen in Verbindung stehen, reduziert sich somit der Korrelationskoeffizient. Die Bereiche der Inputfaktoren bilden hierbei die Unsicherheiten der Produkt- und Produktionsinformationen ab. Die Informationen bezüglich der Unsicherheiten der Prozess- und Ressourceninformationen werden durch die Bereiche der Einflussfaktoren beschrieben.

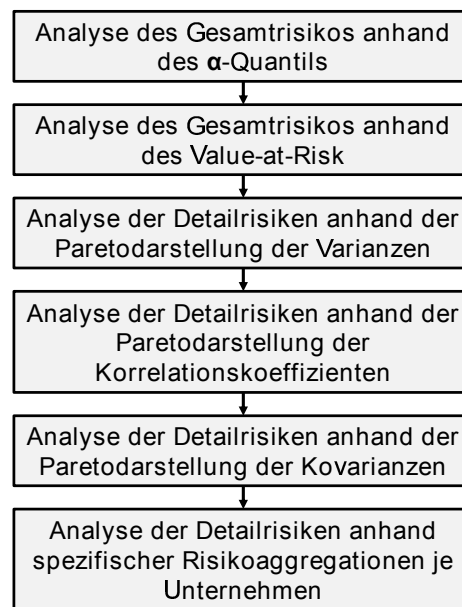


Abb. 3.25: Prozessschritte im Zuge der Analyse des Gesamtrisikos und der Einflüsse der Detailrisiken

Durch Einengung dieser Bereiche, die sich anhand der Paretoanalyse der Korrelationseinflussgrößen als wichtigste herausgestellt haben, ist es möglich, die Korrelationskoeffizienten weiter zu reduzieren. Im Extremfall können Informationen gewonnen werden, die dazu führen, dass der Bereich mit einem Fixwert ersetzt wird.

3.5 Gesamtprozess zur Methodik

Der Prozess der Gesamtmethodik zur Quantifizierung und Aggregation von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung beinhaltet drei übergreifende Prozessschritte, die sequenziell durchlaufen werden. Zuerst werden die Korrelationen der einzelnen Dimensionierungsgrößen im Unternehmen ermittelt und für das Berechnungsmodell zur Verfügung gestellt. Zusätzlich erfolgt die Quantifizierung der Unsicherheiten und der Erwartungswerte auf der Ebene der Dimensionierungsgrößen durch Experten. Durch Kombination der beiden Informationsarten wird die Basis für die Berechnung gelegt. Die Berechnung für einen spezifischen Anwendungsfall wird als zweiter Schritt definiert. Im letzten Teilprozess erfolgt die Analyse und Auswertung der Daten, die durch das mathematische Modell für den Anwendungsfall generiert werden. Als Unterstützung für Entscheidungsträger existieren verschiedene Datenaufbereitungsmöglichkeiten, die jeweils für eine spezifische Anwendung vorbereitet werden. Die Prozessschritte werden in einer Übersicht in Abbildung 3.26 dargestellt.

Mit dieser Einteilung gleicht die Methodik der grundlegenden Herangehensweise von technischen Berechnungen mithilfe der Finite Element Method (FEM), die vielfältige Mög-

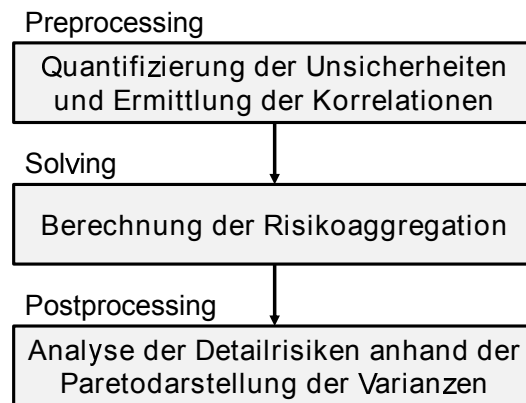


Abb. 3.26: Hauptprozessschritte im Zuge der Gesamtmethodik zur Quantifizierung und Aggregation von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung

lichkeiten zur Strukturanalyse von Bauteilen bietet. Hierbei werden zuerst die Anwendungsdaten im Preprocessing für die Berechnung als mathematisches Modell vorbereitet. Es werden spezifische Anfangsbedingungen, Lastenfälle und Vereinfachungen definiert. Im nächsten Schritt erfolgt für den spezifischen Anwendungsfall die Berechnung mit dem Lösungsalgorithmus, dem sogenannten Solving, und zuletzt werden die Ergebnisdaten im Postprocessing grafisch und textuell aufbereitet, um das Ergebnis interpretieren zu können und dadurch Entscheidungen zu unterstützen. (vgl. Zienkiewicz et al. (2013, S. 641 ff.))

Aufgrund der Analogie der Vorgehensweise zwischen der hier vorgestellten Methodik und FEM werden die Begriffe Preprocessing, Solving und Postprocessing übernommen.

3.6 Zwischenfazit

Mit der Methodik zur Quantifizierung und Aggregation von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung wird die Grundlage geschaffen, Informationen über Unsicherheiten einheitlich in einem mathematischen Modell zusammenzufassen und für verschiedene Analyseübersichten zu aggregieren. In diesem Modell finden mögliche Risikokorrelationen der einzelnen Dimensionierungsgrößen besondere Berücksichtigung.

Die Methodik und speziell das mathematische Modell konzentrieren sich auf die Dimensionierungsgrößen Betriebsmittel, Personal und Flächen, die im Zuge frühzeitiger Planung von Fabriken in Hinsicht auf eine nachfolgende Angebotslegung entsprechend den Anforderungen ausgelegt werden. Gerade in dieser frühen Phase werden Planer mit verschiedenartigen Unsicherheiten konfrontiert, welche die Dimensionierung maßgeblich beeinflussen. Um diese Unsicherheiten quantifizieren und dann aggregieren zu können, wird ein mathematisches Modell auf der Basis der Portfolio-Theorie (vgl. Markowitz

(1959)) verwendet, das besondere Rücksicht auf mögliche Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen voneinander nimmt. Für die Abbildung von Abhängigkeiten werden Vereinfachungen getroffen, um die entsprechenden Voraussetzungen für die Lösung zu gewährleisten. Eine besondere Bedeutung stellt die Annahme der Normalverteilung zur Quantifizierung der Unsicherheiten auf der Ebene der Dimensionierungsgrößen dar. Eine mathematische Begründung wird in Kapitel 3.4.2 vorgestellt. Zusätzlich werden die Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen linear in Form von Korrelationen abgebildet. Dadurch besteht die Möglichkeit, das Problem analytisch mit einer Kovarianzmatrix zu lösen. Neben diesen beiden maßgeblichen Vereinfachungen werden im Modell noch weitere Annahmen getroffen, wobei an dieser Stelle auf das entsprechende Kapitel 3.4.2 verwiesen wird.

Durch die getroffenen Modellvereinfachungen und -vernachlässigungen können im Ergebnis Abweichungen entstehen, die im Zuge der Verifikation und Validierung (siehe hierzu Kapitel 5) bezüglich ihrer Auswirkungen untersucht werden. Eine Besonderheit stellt die Ermittlung der Korrelationen mittels eines eigens erstellten Kostenmodells dar. Entgegen der vorgeschlagenen Vorgehensweise in der Portfolio-Theorie, historische Daten für die Korrelationsermittlung zu betrachten, beziehungsweise die Korrelationen direkt zu schätzen (vgl. Touran (1993)), wird in dieser Methodik ein Kostenmodell herangezogen, um die Korrelationen zu berechnen. Hierzu wird eine Monte-Carlo-Simulation mit veränderlichen Inputwerten, basierend auf dem Kostenmodell, verwendet, die eine entsprechende Outputanzahl generiert, mit der eine Analyse der Korrelationen möglich ist. In der Literatur existieren verschiedene Formen von Kostenmodellen, wobei in der Methodik speziell auf ein vereinfachtes relatives Kostenfaktormodell eingegangen wird, das für die Anforderungen zur Korrelationsanalyse entwickelt wird. Dennoch besteht auch die Möglichkeit, andere Kostenmodelle zu verwenden.

Durch die Verwendung von Modellen zur Ermittlung der Korrelationen wird der Nachteil des Vergangenheitsbezugs ausgeglichen. Werden Korrelationen nur auf der Basis von historischen Daten ermittelt, dann basieren die Abhängigkeiten auf den Beziehungen während der Vergangenheit. Ein Modell kann jedoch beispielsweise bei der Verwendung neuer Produktionstechnologien an die neuen Beziehungen angepasst werden, wodurch dann die Korrelationskoeffizienten zukunftsbezogen berechnet werden können.

Für die generierten Daten über das Risiko im jeweiligen Fabrikplanungsfall stehen durch diese Methodik spezifische Auswertungsmöglichkeiten zur Verfügung, die sich sowohl auf die Gesamtsicht als auch auf beliebig konfigurierbare Detailsichten beziehen. Für die Analyse werden Werte, basierend auf dem α -Quantil, der Definition des Value-at-Risk, auf Paretodarstellungen von Risikoeinflüssen und normierten Darstellungen der Detailrisikowerte, verwendet. Für den Entscheidungsträger stehen damit Werkzeuge zur Verfügung, einerseits Preisentscheidungen zu treffen und andererseits geeignete Risikostrategien einzuleiten.

4 Prototypische Umsetzung der Methodik

4.1 Vorgehensweise im Anwendungsfall

Das für den Anwendungsfall notwendige Expertenwissen wurde in mehreren Runden von Experteninterviews im Zeitraum April 2012 bis März 2013 bei einem Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen in der Automobilindustrie in Europa in einer Primärerhebung aufgenommen. Hierbei wurden Experten der Gewerke Rohbau, Lack, Montage, Supply Chain Management, Qualität sowie der unterstützenden Bereiche Controlling und Angebotslegung in mehr als zwanzig qualitativen Interviews im Zuge eines Kooperationsprojektes unter der Führung des Kompetenzzentrums VIRTUAL VEHICLE befragt. Bei den Interviews stand die Kompetenz der Befragten im Vordergrund (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 237)), weshalb ein teilstandardisiertes Vorgehen mit einem Interviewleitfaden gewählt wurde. Die Interviews hatten das Ziel, die Methodik der Dimensionierung von Gesamtfahrzeugproduktionen aufzunehmen und Verbesserungspotentiale zu identifizieren. Während der Methodikaufnahme wurden die wesentlichen Haupteinflussgrößen als Inputwerte der Planung mit den Dimensionierungsgrößen als Outputwerte in Verbindung gesetzt. Die Interviews wurden größtenteils als Einzelinterviews mit jeweils zwei Interviewern geführt und mit Stichworten protokolliert, während bei Diskussionen von Überschneidungen zweier Gewerke Gruppeninterviews von zwei Personen durchgeführt wurden. Im Zuge von regelmäßig stattfindenden Workshops wurden die Ergebnisse diskutiert und die Methodik mit allen Experten plausibilisiert.

Als Basis der Dimensionierung dienen im Zuge der Fabrikplanung gewerkespezifische Berechnungen. Durch deren Analysen wird versucht, aus den schon vorhandenen sekundären Datenbeständen Informationen für den Anwendungsfall anhand dieser Sekundärerhebung zu gewinnen. Ein besonderer Fokus liegt in der Analyse der Beziehungen zwischen den in der Primärerhebung identifizierten Haupteinflussgrößen und den Dimensionierungsgrößen.

Nach der Datenerhebung erfolgt die Ausarbeitung des mathematischen Modells zur Ermittlung der Korrelationskoeffizienten. Als erster Schritt der Modellerstellung werden alle in der frühen Fabrikplanung betroffenen Daten in einem gemeinsamen Datenmodell dargestellt. Anschließend wird das relative Kostenfaktormodell nach Schritt A (siehe hierzu Kapitel 3.4.2) ausgearbeitet, um damit einen genügend großen Stichprobenumfang für

die Berechnung der Korrelationskoeffizienten zu generieren. Die Beziehungen im Modell werden auf der Basis der primären und sekundären Datenerhebung erstellt.

Abschließend wird die Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanungsphase in einem fiktiven Fahrzeugprojekt angewendet. Die Funktionalitäten werden mithilfe dieser Beispieldaten gezeigt. Der Fokus liegt auf der Darstellung der Funktionalitäten und der Analysemöglichkeiten hinsichtlich des Risikos, wobei diese trotz der Wahl eines fiktiven Projektes bestehen bleiben und somit für die Validierung als Basis dienen können.

In Abbildung 4.1 wird das Vorgehen im Anwendungsfall in einem Überblick dargestellt.

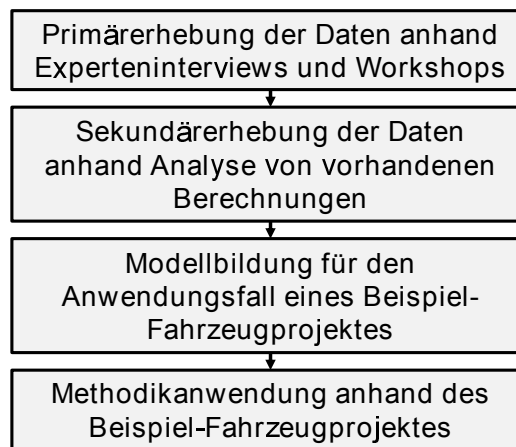


Abb. 4.1: Vorgehen im Anwendungsfall

4.2 Daten im Anwendungsfall

4.2.1 Geheimhaltung der Daten

Obwohl die entwickelte Methodik und das Modell durch den Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen in der Automobilindustrie motiviert sind, werden vereinfachte Daten aufgrund von branchenüblichen Geheimhaltungsvereinbarungen für die Verifikation und Validierung der Methode und des Modells verwendet. Aus den genannten Geheimhaltungsgründen werden Berechnungsdetails sowie Interviewprotokolle nicht in diese Arbeit inkludiert. Zusätzlich werden die Ergebnisse nicht in absoluten beziehungsweise realen Werten dargestellt. Eine Überprüfung der Methodik und des Modells ist dennoch möglich, da die Beziehungen und Abhängigkeiten im Zuge der Planung nicht verfälscht werden.

4.2.2 Anwendungsfall

In der frühen Fabrikplanung werden verschiedene Gewerke und Prozesse dimensioniert, die direkt an der Produktion beteiligt sind oder diese unterstützen. Im Anwendungsfall werden die wertschöpfenden Herstellungsprozesse Rohbau (R), Lack (L) und Montage (M) als Beispiel betrachtet, die nur einen Teil der Wertschöpfungskette der Automobilindustrie abdecken. Die Fabrikplanung der frühen Phase besitzt hierbei als Outputgrößen jeweils die Dimensionierungsgrößen Personal (P), Betriebsmittel (B) und Flächen (F). Lediglich beim Prozess Lack werden die Flächen vom in dieser Arbeit kooperierenden Unternehmen aus internen Verrechnungsgründen nicht mit betrachtet und in die anderen Dimensionierungsgrößen integriert.

Klug (2010, S. 5) definiert Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Endmontage als Kernfertigungsbereiche der Automobilfabrik. Zusätzlich zu den Kernfertigungsbereichen existiert ein komplexes Produktionsnetzwerk an Lieferanten, die als Teile-, Baugruppen- oder Modulfertiger in die Wertschöpfungskette integriert sind (vgl. Heigl & Rennhak (2008, S. 30 f.)). Im Anwendungsfall werden die Teile des Presswerkes, dessen Aufgabe die Verformung von Blechen ist, von einem Lieferanten übernommen und deshalb in diese Arbeit nicht integriert. Im Karosseriebau (Rohbau) werden die im Presswerk gefertigten Einzelteile der Karosserie mit verschiedenen Verbindungstechnologien in mehreren Prozessschritten miteinander verbunden (vgl. Klug (2010, S. 408 f.)). Anschließend werden in der Lackiererei (Lack) nach einer mehrstufigen Vorbehandlung die verschiedenen Lack- und Schutzschichten in einem komplexen Vorgang aufgetragen (vgl. Klug (2010, S. 414)). Im letzten Bereich der Automobilfabrik werden in der Endmontage (Montage) alle Teile und Module des Automobils hinsichtlich der vom Endkunden ausgewählten Variante zusammengefügt, mit Betriebsstoffen befüllt und das Produkt für die Auslieferung vorbereitet (vgl. Klug (2010, S. 420 ff.)). Zwischen den drei betrachteten Bereichen werden Lager für den Umlaufbestand eingeführt, um die zeitlich getakteten Produktionslinien zu entkoppeln und eine Neuordnung der Auftragsreihenfolge ohne Linienstopp durchführen zu können (vgl. Ramsauer (2009, S. 23)). Neben den beschriebenen Tätigkeiten existieren verschiedene unterstützende Bereiche, wie beispielsweise das Qualitätsmanagement und das Supply Chain Management, auf die in dieser Arbeit mit dem Schwerpunkt auf wertschöpfenden Tätigkeiten nicht eingegangen wird. Über eine gesonderte Analyse dieser unterstützenden Bereiche können diese jedoch ebenfalls in die Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten integriert werden.

In der Automobilbranche werden eigene Begriffe für das Produktionsnetzwerk mehrere Lieferanten und Lieferantenebenen geprägt. Vielfach wird für den Hersteller oder Markeninhaber der Begriff Original Equipment Manufacturer (OEM) gewählt (vgl. Ihme (2006, S. 278)). Die Lieferanten werden dann nach den Ebenen der Wertschöpfung unterschieden, wobei ein Tier-1 Lieferant auf oberster Ebene als System- oder Modulanbieter eingeordnet wird (vgl. Fieten (1991, S. 60)). Die Lieferantenebenen werden dann absteigend

nummeriert. Eine Besonderheit stellt dabei ein sogenannter Tier-0,5 Lieferant dar, der neben der Fertigung des Automobils auch die Forschung und Entwicklung von diesem anbietet und zusätzlich beim Marketing Dienstleistungen erbringen kann (vgl. Schuh & Kampker (2011, S. 485) und Heigl & Rennhak (2008, S. 31)).

Grundsätzlich wird eine Brownfield-Planung betrachtet, wobei die Planung auf einer bestehenden Fabrik aufgebaut wird (vgl. Ramsauer (2009, S. 141 f.)). Es ist festgelegt, dass sich dieser Standort in Europa befindet und die Rahmenbedingungen der Fabrik bekannt sind. Neben dem Standort wird dadurch auch die maximale Stückzahl als wichtiger Inputwert der Berechnung fixiert. Zusätzlich müssen im Planungsfall Übernahmen von vorhandenen Betriebsmitteln, bauliche Voraussetzungen der bestehenden Hallen, laufende Produktionen und gegebenenfalls Integration von neuen Produkten in Linien von bereits produzierten Produkten berücksichtigt werden. Im Falle der Automobilproduktion übersteigt der Wert der Betriebsmittel den Wert der Halle, die folglich als Hülle mitberücksichtigt wird und die notwendige Infrastruktur bereitstellen muss (vgl. Wiendahl et al. (2009, S. 487))). Eine Brownfield-Planung definiert damit das Gegenstück einer Greenfield-Planung, bei der eine Fabrik gänzlich neu auf die sogenannte „grüne Wiese“, geplant und gebaut wird (vgl. Ramsauer (2009, S. 141)). Vorhandene Betriebsmittel entscheiden vielfach über den Automatisierungsgrad, der für eine Fabrik beschreibt, wieviel Prozent der Tätigkeiten automatisiert durchgeführt werden. Als Basis der Berechnung des Automatisierungsgrades dienen einerseits der Wert W_{BM} der Betriebsmittel in der Fertigung und andererseits die Personalkosten PK_{WS} für die wertschöpfenden Tätigkeiten (vgl. Steiner (2006, S. 12)):

$$\text{Automatisierungsgrad} = \frac{W_{BM}}{PK_{WS} + W_{BM}} \quad (4.1)$$

4.3 Die Herausforderungen der Gesamtfahrzeugproduktion in der europäischen Automobilindustrie

4.3.1 Die europäische Automobilindustrie

Die europäische Automobilindustrie und deren Kunden bieten besondere Herausforderungen an die Automobilproduktion sowie Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen. Gerade das Eingehen auf spezifische Kundenwünsche, die Auswirkungen auf vielfältige Ausstattungsmerkmale haben, prägen die Produktion am europäischen Markt (vgl. Ramsauer (2009, S. 22)). Generell bietet dieser Markt einen wachsenden Konkurrenzkampf, eine Verkürzung der Durchlaufzeit der Produktion und der Lieferzeiten, Verbesserung der Produktqualität und hohe Kostensensitivität (vgl. Roy et al. (2011, S. 694) und Ramsauer (2009, S. 21 ff.)). Ein Auftragsfertiger steht zusätzlich unter einem enorm hohen Wettbewerbsdruck, da oft der Kunde selbst als Original Equipment

Manufacturer (OEM) den eigentlichen Wettbewerber im Zuge von Fremdvergabeüberprüfungen darstellt (vgl. Unzeitig et al. (2013, S. 72)).

4.3.2 Vielfalt an Produktvarianten

Obwohl das Automobil als Produkt über das letzte Jahrhundert ein ähnliches Erscheinungsbild sowie ähnliche Karosserietypen behielt und damit suggeriert, dass das Produkt an sich ähnlich bleibt (vgl. Souchoroukov (2004, S. 27 ff.), veränderte sich die Produktion grundlegend von einer anfangs handwerklichen Produktion über die Massenproduktion zu einer kundenindividuellen Massenproduktion (vgl. unter anderen Ramsauer (2009, S. 21 ff.), Pine (1993, S. 9 ff.) und Womack et al. (1990, S. 9 ff.)). Mit einer kundenindividuellen Massenproduktion soll ermöglicht werden, die Produktvariantenvielfalt der Marktanforderungen zu erfüllen, sowie auch die Kosten und Qualität der Produktion zu optimieren. Die Varianz eines Fahrzeuges ist durch die Karosserie-, Farb-, Technik- und Bauteilvarianz gekennzeichnet (vgl. Klug (2010, S. 49)). Die Technikvarianz bezeichnet hierbei Veränderungen am Produkt, die aufgrund von schnelleren Entwicklungszyklen und kürzeren Produktlebenszyklen ausgelöst werden (vgl. Klug (2010, S. 49)).

Je später sich ein Produktionsprozess in der Wertschöpfungskette befindet, desto mehr ist er von einer Variantenvielfalt und vom Variantenmanagement betroffen. Wird im Rohbau noch eine überschaubare Anzahl an Karosserietypen erstellt, die dann im folgenden Gewerk gemäß den Kundenanforderungen lackiert werden und somit die Variantenzahl erhöht wird, steht die Montage als letzter Prozessschritt, der alle Teile zu einem Ganzen zusammenführt, vor der Herausforderung, alle möglichen Varianten in einer für jedes Automobil gleichen Taktzeit erstellen zu können. Klug (2010, S. 49) spricht in diesem Zusammenhang von bis zu 10^{31} Varianten je Fahrzeugtyp, die aufgrund der theoretisch möglichen Kombinationen auftreten können. Ein Variantenmanagement versucht hierbei, spezifische Kombinationen in Ausstattungsmodellen zusammenzufassen, um dadurch gewisse Varianten zu vermeiden (vgl. Klug (2010, S. 51 ff.)). Ein weiteres Vorgehen des Variantenmanagements ist die späte Variantenbildung, um den Steuerungsaufwand in der Produktion so gering wie möglich zu halten (vgl. Klug (2010, S. 55 ff.)).

4.3.3 Geschäftsfälle eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen

Hohe Stückzahlen sowie die hohen Qualitätsansprüche und die relativ lange Durchlaufzeit der Produkte ermöglichen es, die Produktion detaillierter voranzuplanen und dadurch wirtschaftliche Vorteile zu generieren (vgl. Bracht et al. (2011, S. 268)). Ein Auftragsfertiger für Gesamtfahrzeuge steht vor der Geschäftsfeldentscheidung, als Volumenanbieter hohe Stückzahlen zu niedrigen Kosten herzustellen oder als Nischenanbieter spezifische Kundenlösungen für ein kleines Marktsegment zu bieten (vgl. Heigl &

Rennhak (2008, S. 62)). Im vorliegenden Fall wird ein Nischenanbieter betrachtet, der auf höherwertige Fahrzeuge mit einer maximalen Stückzahl spezialisiert ist. Hierfür ist ein schnelles und effektives Eingehen auf die ganz individuellen Anforderungen des OEMs notwendig, wodurch langfristige Kundenbeziehungen gefördert werden (vgl. Heigl & Rennhak (2008, S. 64)).

In der Herstellung von Gesamtfahrzeugen bietet sich dem Auftragsfertiger ein Geschäftsfeld mit wenigen großen Einzelverträgen, die eine Vereinbarung für eine relativ lange Zeitdauer vornehmen (vgl. Buch et al. (2011, S. 3002)). Die Zeitdauer wird dabei von der maximalen Lebensdauer des Produktes begrenzt, wobei eine Vorlaufzeit für die Planungs- und Anlaufphase in diese Dauer inkludiert wird. Dies setzt die Angebotslegung unter besonderen Druck, da eine fehlerhafte Vorkalkulation und falsche Einschätzung der Unsicherheiten die Wirtschaftlichkeit des Unternehmens gefährdet.

4.3.4 Herausforderungen eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen im Zuge der frühen Fabrikplanung

Für einen Auftragsfertiger gelten die schon in Kapitel 2.3.6 beschriebenen Herausforderungen der frühen Fabrikplanungsphase, wobei diese Liste noch auf Basis der primären und sekundären Datenerhebung um ergänzt und detailliert wird, wie nachfolgend beschrieben wird.

Bei der Übergabe der Produktinformationen an die Fabrikplanung entsteht durch die Beziehung Tier-1 Zulieferer zu OEM eine Schnittstelle, die beide Unternehmen betrifft. In der Angebotslegung für Produktionsprojekte arbeiten üblicherweise Vertrieb des Tier-1 Zulieferers und Einkauf des OEM zusammen. Gerade bei Angeboten von großen Mengen und hohem Wert werden hierfür häufig Key Account Manager (KAM) eingesetzt, die ein unkoordiniertes Auftreten von mehreren Mitarbeitern gegenüber den Kunden verhindern sollen. Betrachtet man den Informationsfluss, dann übergibt die Produktentwicklung die Produkt- und Produktionsinformationen, die zu Beginn der Angebotsphase vorhanden sind, an den Einkauf des OEM. Vom Einkauf werden diese Informationen an den KAM übermittelt, der sie dann an die Planungsexperten beim Tier-1 Zulieferer verteilt. Ergeben sich Rückfragen bei den Planern, wird der Prozess in die entgegengesetzte Richtung durchlaufen. Bei neuen Informationen von der Produktentwicklung bleibt der Prozess über die beschriebenen Stellen ebenfalls bestehen. Dadurch können entsprechende Verzögerungen und Unsicherheiten in der Kommunikation auftreten, die einer schnellen und effizienten Fabrikplanung im Wege stehen, auch wenn Vorteile durch eine koordinierte Kommunikation nachgewiesen sind. Eine frühzeitige Anbindung des Zulieferers an den Hersteller im Zuge der Produktentwicklung kann dabei mögliche Nachteile ausgleichen und einen gemeinsamen Nutzen bringen. (vgl. Heigl & Rennhak (2008, S. 75 ff.))

Ein Auftragsfertiger steht ebenfalls vor der Aufgabe, Fabriken für Kunden in unterschiedlichen Planungssystemen zu dimensionieren und auszulegen, die bei Bedarf auch deren Entwicklungs- und Planungsprozesse abbilden können. Zusätzlich steht er vor der Schwierigkeit, dass unterschiedliche Fahrzeugtypen mit verschiedenen Maßen und Produktionsvorgaben in derselben Fabrik produziert werden. Je Kunde können unterschiedliche Vorgaben für Tier-2 Zulieferer und das Supply Chain Management (SCM) sowie differierende Qualitätsvorgaben für das Produkt existieren, die es zu realisieren gilt. Unterschiede bestehen außerdem in länderspezifischen Gesetzen und Richtlinien.

Zusätzlich zu den intern geforderten Kriterien Zeit, Kosten und Qualität der Planung wird von einem Auftragsfertiger Flexibilität gegenüber sich ändernder Produkt- und Produktionsinformationen vorausgesetzt, die in die Planung und letztendlich in das Angebot einfließen sollen. Nachdem vielfach mit der Fabrikplanung angefangen wird, bevor die Produktentwicklung vollständig abgeschlossen ist, können laufend Veränderungen auftreten, die die Fabrikplanung maßgeblich beeinflussen. Ebenfalls nehmen Marketingprognosen und Änderungen in der Fremdvergabestrategie des OEM sowohl Einfluss auf die Stückzahl als auch auf den Variantenmix, der eine gewichtete Kennzahl über das künftige Auftreten von Varianten im Zuge der Fertigung darstellt. Die Jahresstückzahl stellt einen Haupteinflussfaktor in der Fabrikplanung dar und beeinflusst somit maßgeblich die Dimensionierungsgrößen, wobei sie während der die Fertigungsdauer auch schwanken kann. Der Auftragsfertiger muss also in seiner Planungsmethodik die Änderung schnell und nachvollziehbar berücksichtigen können. Ebenso können Vorkalkulationen angefragt werden, bei denen die Produktentwicklung abgeschlossen ist und somit die Unsicherheiten der Produktinformationen sehr niedrig sind. In diesem Fall ist eine effektive, schnelle Planung notwendig. Die Planungsmethodik muss also sowohl mit hohen exogenen Unsicherheiten hinsichtlich der Produktinformationen umgehen können, als auch eine Möglichkeit bieten, effektive Planungen bei niedrigen Produktunsicherheiten umzusetzen.

In der Automobilindustrie stellt eine Produktion nach der kundenindividuellen Massenproduktion den Stand der Technik dar, den es umzusetzen gilt. Gerade für die europäische Automobilindustrie stellt dieser besondere Zugang auf die Wünsche des Endkunden und Berücksichtigung in vielfältigen Ausstattungsvarianten ein bezeichnendes Merkmal dar, das auch an die gesamte Zulieferindustrie der Automobilbranche weitergegeben wird (vgl. Ramsauer (2009, S. 22)).

In Abbildung 4.2 wird eine Übersicht der Herausforderungen eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen dargestellt.

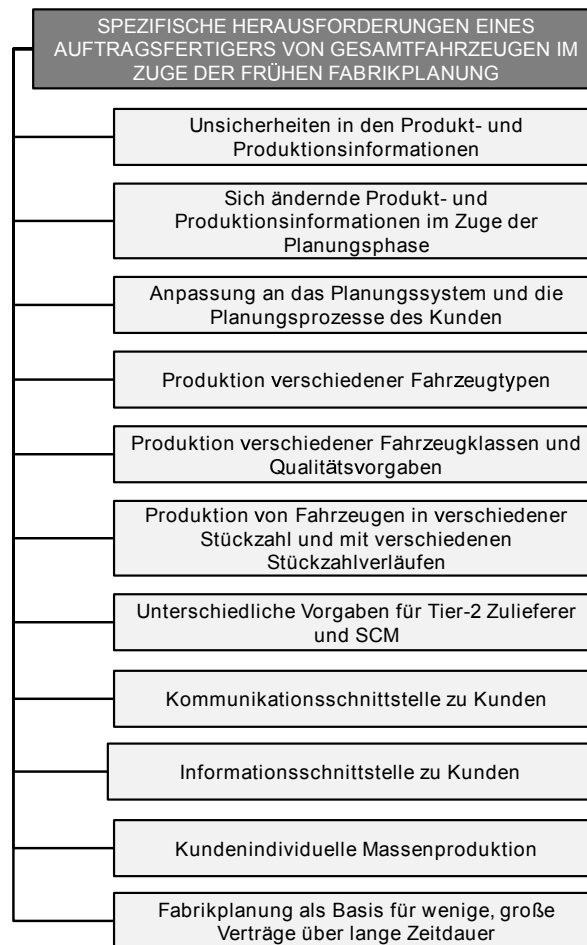


Abb. 4.2: Spezifische Herausforderungen eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen im Zuge der frühen Fabrikplanung

4.3.5 Verbesserungspotential im Anwendungsfall hinsichtlich der Berücksichtigung von Unsicherheiten

Im Zuge der Experteninterviews und Workshops wurde erhoben, dass verschiedenartige Unsicherheiten Schwierigkeiten bei der Planung verursachen. Zum einen stehen oftmals nicht alle Informationen eines nicht vollständig entwickelten Fahrzeugs vom Kunden des Auftragsfertigers zur Verfügung, die das Produkt und die Produktion genau spezifizieren. Zum anderen können im Zuge der frühen Planungsphase Prozessuntersuchungen nicht in einer detaillierten Form durchgeführt werden, um Unsicherheiten hierbei vollkommen auszuschließen. Zusätzlich stehen Informationen über Ressourcen, durch deren Einsatz die Wertschöpfung erfolgt, nur in begrenztem Ausmaß zur Verfügung.

Wird beispielsweise die Verbindungstechnik im Zuge des Rohbaus der Karosserie betrachtet, besteht die Möglichkeit, dass die Anzahl der Verbindungspunkte zwischen den einzelnen Blechteilen von der Produktentwicklung noch nicht vollständig ermittelt wurde. Vielfach kann der Planungsexperte auf Basis von Vergleichsprodukten und Erfahrungs-

werten einschätzen, in welchem Bereich sich diese Anzahl für ein spezifisches Fahrzeug befindet. Bei der Planung des Produktionsprozesses und der Zuordnung der Ressourcen, die den Prozessschritt durchführen, soll dieser mögliche Bereich Berücksichtigung finden und sich auch in der Anzahl der benötigten Ressourcen widerspiegeln. Eine übliche Vorgehensweise ist hierbei, diesen Unsicherheitsbereich mit einem Aufschlag zu berücksichtigen, um das Risiko eines zu geringen Angebotswertes zu vermeiden. Weitere Unsicherheitsfaktoren stellen zukünftige Preis- und Technologieentwicklungen beispielsweise von den eingeplanten Robotern dar, die ebenfalls in den Aufschlägen inkludiert werden. (vgl. Unzeitig, Schafler, Stocker, Weghofer & Flasch (2014))

Durch die getätigten Aufschläge gehen jedoch die Informationen verloren, welche Unsicherheitsbereiche in den jeweiligen Detailplanungen sowie in der Gesamtplanung existieren und welche Unsicherheiten Berücksichtigung finden. In Preisverhandlungen auf Basis der Fabrikplanung fehlt dann für den Entscheidungsträger die Information, welches Risiko er bei welchem Preis in Kauf nimmt. Dieses Gesamtrisiko setzt sich aus den Unsicherheiten der einzelnen Planungsbereiche zusammen. Besteht vor Preisverhandlungen die Möglichkeit, mit Unsicherheiten behaftete Informationen mit dem Kunden genauer zu spezifizieren, Planungsunsicherheiten durch detaillierte Betrachtungen zu verringern oder Ressourceninformationen mit dem Lieferanten zu präzisieren, dann wird das Potential geschaffen, das Gesamtrisiko zu senken und beispielsweise einen geringeren Preis bei gleichem Risiko anzubieten. Eine solche Betrachtung des Risikos setzt jedoch die Quantifizierung der Unsicherheiten und deren Integration in die Fabrikplanung voraus.

4.4 Veranschaulichendes Beispiel zur Modellumsetzung

In diesem Kapitel wird die beschriebene Vorgehensweise zur Erstellung eines mathematischen Modells zur Risikoaggregation, die in Abbildung 3.14 beschrieben wird, anhand eines vereinfachten Beispiels der Fabrikplanung von Gesamtfahrzeugen demonstriert. Die Berechnungsschritte werden detailliert beschrieben und alle Ergebnisse dargestellt, um eine Transparenz der Berechnung und eine etwaige Nachberechnung zu gewährleisten. Eine Gesamtübersicht über den Anwendungsfall wird in Kapitel 4.5 gegeben, wobei diese aus Geheimhaltungsgründen keine Details enthält.

Im vereinfachten Beispiel werden die zwei Gewerke Rohbau und Montage betrachtet, wobei im Speziellen die Dimensionierungsgrößen Personal Rohbau Pe^{RB} und Betriebsmittel Montage BM^M gewählt werden. Personal Rohbau besteht aus den Arbeitern der Linie AL , Angestellten Ang und Arbeitern der Instandhaltung AI . Die Dimensionierungsgröße Betriebsmittel Montage wird in Maschinen MA und Werkzeuge/Ladungsträger WL unterschieden. Diese Unterscheidung entspricht den Detaildimensionierungsgrößen.

Die Inputwerte, die auf die Detaildimensionierungsgrößen wirken, bestehen aus den Parametern des Gesamtfahrzeuges, die diese Detaildimensionierungsgrößen am meisten

beeinflussen. Im Beispiel werden sie mit der Jahresstückzahl SZ , der Teileanzahl Rohbau RTA , der Türenanzahl TA sowie der Sitzanzahl SA definiert. Bei der Modellumsetzung sind diese Inputwerte mit den Experten zu erheben.

4.4.1 Relatives Kostenfaktormodell am veranschaulichenden Beispiel

Ermittlung der Einflussmatrix

Im ersten Schritt zur Erstellung des relativen Kostenfaktormodells gilt es nun, die Inputfaktoren mit den Detaildimensionierungsgrößen für die betrachtete Fabrik in Verbindung zu setzen. Hierfür dienen Expertenschätzungen, die durch die Ratingskala aus Abbildung 3.10 sowie Tabelle 3.7 unterstützt werden. In Abbildung 4.3 wird das beispielhafte Ergebnis der Expertenschätzung in Form einer Matrix mit 4 Inputwerten und 5 Outputwerten, den Detaildimensionierungsgrößen, dargestellt. Beispielsweise wirken sich Änderungen der Jahresstückzahl in einem hohen Ausmaß auf die Anzahl und somit Kosten der Arbeiter der Linie im Rohbau aus, Änderungen der Teileanzahl Rohbau in einem mittleren Ausmaß auf diese und Änderungen der Türenanzahl sowie Sitzanzahl nur in einem geringen beziehungsweise nicht erfassbaren Ausmaß.

Detaildimensionierungsgröße	Inputfaktor Produktparameter				
	Kostenanteil an einem Standardprodukt	Jahresstückzahl	Teileanzahl Rohbau	Türenanzahl	Sitzanzahl
Rohbau: Arbeiter Linie	0,75	hoch 25	mittel 10	gering 1	kein 0
Rohbau: Angestellte	0,01	mittel 10	gering 1	kein 0	kein 0
Rohbau: Arbeiter Instandhaltung	0,24	hoch 25	mittel 10	gering 1	kein 0
Montage: Maschinen	0,60	mittel 10	kein 0	mittel 10	kein 0
Montage: Werkzeuge/Ladungsträger	0,40	hoch 25	kein 0	mittel 10	gering 1

Abb. 4.3: Beispielhafte Einflussmatrix von 4 Einflussfaktoren auf die Dimensionierungsgrößen Personal Rohbau und Betriebsmittel Montage

Zusätzlich beinhaltet die Einflussmatrix Informationen bezüglich des prozentuellen Kostenanteils, den jede Detaildimensionierungsgröße im Hinblick auf die Dimensionierungsgröße bei einem Standardprodukt besitzt. Im konkreten Fall setzen sich beispielsweise die Kosten des Personals Rohbau aus 75 Prozent Kosten für Arbeiter der Linie, 1 Prozent Kosten für Angestellte und 24 Prozent Kosten für die Arbeiter der Instandhaltung zusammen. Die Kosten der Betriebsmittel Montage bestehen im Standardfall zu 60 Prozent aus Maschinenkosten und 40 Prozent aus Kosten für Werkzeuge und Ladungsträger. Die Werte der Kostenanteile werden für ein Standardprodukt geschätzt beziehungsweise auf Basis der Kalkulation eines Standardproduktes ermittelt. Dadurch ist der Ausgangspunkt dafür gegeben, das Kostenfaktormodell für die Korrelationsanalyse der Dimensionierungsgrößen zu erstellen zu können.

Generierung des relativen Kostenfaktormodells

Im nächsten Schritt werden die Einflüsse jedes Inputwertes auf jede Detaildimensionierungsgröße Ef_{DDim}^{Gew} zum Einflussfaktor der einzelnen Dimensionierungsgrößen je Gewerk Ef_{Dim}^{Gew} summiert. Der Einflussfaktor Ef_{PeSZ}^{RB} , der den Einfluss der Änderung der Jahresstückzahl auf die Kosten des Personals Rohbau quantifiziert, wird mit nachfolgender Formel berechnet.

$$Ef_{PeSZ}^{RB} = an_{ALPe}^{RB} Ef_{ALPeSZ}^{RB} + an_{AngPe}^{RB} Ef_{AngPeSZ}^{RB} + an_{AlPe}^{RB} Ef_{AlPeSZ}^{RB} \quad (4.2)$$

Mit den Beispielwerten ergibt sich folgende Gleichung:

$$Ef_{PeSZ}^{RB} = 0,75 * 25 + 0,01 * 10 + 0,24 * 25 = 24,85$$

Dies wird für alle Einflussfaktoren sowohl für Personal Rohbau als auch für Betriebsmittel Montage durchgeführt.

$$Ef_{PeRTA}^{RB} = 0,75 * 10 + 0,01 * 1 + 0,24 * 10 = 9,91$$

$$Ef_{PeTA}^{RB} = 0,75 * 1 + 0,01 * 0 + 0,24 * 1 = 0,99$$

$$Ef_{PeSA}^{RB} = 0,75 * 0 + 0,01 * 0 + 0,24 * 0 = 0$$

$$Ef_{BMSZ}^M = 0,60 * 10 + 0,40 * 25 = 16$$

$$Ef_{BM_{RTA}}^M = 0,60 * 0 + 0,40 * 0 = 0$$

$$Ef_{BM_{TA}}^M = 0,60 * 10 + 0,40 * 10 = 10$$

$$Ef_{BM_{SA}}^M = 0,60 * 10 + 0,40 * 1 = 0,4$$

Es ergibt sich die Einflussmatrix **MEf**.

$$\mathbf{MEf}(Ef) = \begin{pmatrix} Ef_{PeSZ}^{RB} & Ef_{PeRTA}^{RB} & Ef_{PeTA}^{RB} & Ef_{PeSA}^{RB} \\ Ef_{BM_{SZ}}^M & Ef_{BM_{RTA}}^M & Ef_{BM_{TA}}^M & Ef_{BM_{SA}}^M \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Mit ausgefüllten Werten lautet die Einflussmatrix folgendermaßen.

$$\mathbf{MEf}(Ef) = \begin{pmatrix} 24,85 & 9,91 & 0,99 & 0 \\ 16 & 0 & 10 & 0,4 \end{pmatrix}$$

Die Einflussmatrix kann zur besseren Vergleichbarkeit relativ (rel) je Zeile dargestellt werden. Hierfür wird die Gesamtsumme SEf_{Dim_j} der Absolutwerte der Einflussfaktoren für jede Dimensionierungsgröße Dim_j ermittelt.

$$SEf_{Pe}^{RB} = |Ef_{PeSZ}^{RB}| + |Ef_{PeRTA}^{RB}| + |Ef_{PeTA}^{RB}| + |Ef_{PeSA}^{RB}| \quad (4.4)$$

$$SEf_P^{RB} = |24,85| + |9,91| + |0,99| + |0| = 35,75$$

$$SEf_{BM}^M = |Ef_{BM_{SZ}}^M| + |Ef_{BM_{RTA}}^M| + |Ef_{BM_{TA}}^M| + |Ef_{BM_{SA}}^M| \quad (4.5)$$

$$SEf_{BM}^M = |16| + |0| + |10| + |0,4| = 26,4$$

Durch Division jedes Einflussfaktors durch die Gesamtsumme jeder Dimensionierungsgröße werden die relativen Einflussfaktoren berechnet. Dadurch können sowohl die relativen Abhängigkeitsfunktionen der betrachteten Dimensionierungsgröße als auch die relative Einflussmatrix \mathbf{MEf}_{rel} gebildet werden. Die Änderung der Inputgrößen kann ebenfalls relativ zu einem Standardfahrzeug abgebildet werden, nachdem das Ziel der Funktionen keine Ermittlung der absoluten Kosten, sondern nur deren relative Änderung ist.

$$P_{e_{rel}}^{RB}(In_i) = \frac{Ef_{PeSZ}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}}SZ_{rel} + \frac{Ef_{PeRTA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}}RTA_{rel} + \frac{Ef_{PeTA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}}TA_{rel} + \frac{Ef_{PeSA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}}SA_{rel} \quad (4.6)$$

$$P_{e_{rel}}^{RB}(In_i) = 0,6951SZ_{rel} + 0,2772RTA_{rel} + 0,0277TA_{rel} + 0SA_{rel}$$

$$BM_{rel}^M(In_i) = \frac{Ef_{BMsz}^M}{SEf_{BM}^M}SZ_{rel} + \frac{Ef_{BMRTA}^M}{SEf_{BM}^M}RTA_{rel} + \frac{Ef_{BMTA}^M}{SEf_{BM}^M}TA_{rel} + \frac{Ef_{BMSA}^M}{SEf_{BM}^M}SA_{rel} \quad (4.7)$$

$$BM_{rel}^M(In_i) = 0,6061SZ_{rel} + 0RTA_{rel} + 0,3788TA_{rel} + 0SA_{rel}$$

$$\mathbf{MEf}_{rel}(Ef_{rel}) = \begin{pmatrix} \frac{Ef_{PeSZ}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}} & \frac{Ef_{PeRTA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}} & \frac{Ef_{PeTA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}} & \frac{Ef_{PeSA}^{RB}}{SEf_{Pe}^{RB}} \\ \frac{Ef_{BMsz}^M}{SEf_{BM}^M} & \frac{Ef_{BMRTA}^M}{SEf_{BM}^M} & \frac{Ef_{BMTA}^M}{SEf_{BM}^M} & \frac{Ef_{BMSA}^M}{SEf_{BM}^M} \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

$$\mathbf{MEf}_{rel}(Ef_{rel}) = \begin{pmatrix} 0,6951 & 0,2772 & 0,0277 & 0,0000 \\ 0,6061 & 0,0000 & 0,3788 & 0,0000 \end{pmatrix}$$

Mit den relativen Abhängigkeitsfunktionen beziehungsweise mit der relativen Einflussmatrix ist das relative Kostenfaktormodell für das vereinfachte Beispiel ermittelt.

4.4.2 Monte-Carlo-Simulation zur Korrelationsanalyse am veranschaulichenden Beispiel

Das Ziel der Monte-Carlo-Simulation ist ein Generieren von zufälligen Ereignissen, die Kosten von möglichen Gesamtfahrzeugprojekten darstellen. Die Gesamtfahrzeugprojekte werden anhand der Inputfaktoren beschrieben. Somit definiert ein Datensatz aller Inputfaktoren ein Gesamtfahrzeugprojekt. Anhand der Inputfaktoren und der relativen Abhängigkeitsfunktionen können die Kosten der Dimensionierungsgrößen für jedes zufällige Ereignis ermittelt werden. Im vorliegenden Beispiel werden die relativen Kosten, ausgehend von den relativen Inputfaktoren, berechnet.

Definition der möglichen relativen Bereiche der Inputfaktoren

Die in Kapitel 4.4.1 beschriebenen Kostenanteile der Einflussfaktoren beziehen sich auf die Werte eines Standardprodukts der betrachteten Fabrik. Von diesem Produkt ausge-

Inputfaktor	Standardprodukt	Minimalgrenze	Maximalgrenze
Jahresstückzahl	20000	10000	50000
relative Jahresstückzahl	100 %	50 %	250 %
Teileanzahl im Rohbau	200	100	500
relative Teileanzahl im Rohbau	100 %	50 %	250 %
Türenanzahl	4	2	6
relative Türenanzahl	100 %	50%	150 %
Sitzeanzahl	5	1	9
relative Sitzeanzahl	100 %	20 %	180 %

Tab. 4.1: Absolute und relative Wertebereiche der 4 Inputfaktoren im veranschaulichenden Beispiel

hend können die Minimal- und Maximalgrenzen für jeden möglichen Bereich eines Inputfaktors definiert werden. Die Grenzen werden durch die einschränkenden Gegebenheiten der spezifischen Fabrik vorgegeben. In Tabelle 4.1 werden die Werte der einzelnen Inputfaktoren in einer Übersicht absolut und relativ wiedergegeben.

Monte-Carlo-Simulation der Inputfaktoren von Beispielfahrzeugen

Zwischen den definierten relativen Grenzen werden für die Inputfaktoren Zufallszahlen mittels einer Monte-Carlo-Simulation in Microsoft® Office Excel® als Softwaretool erzeugt, die einer stetigen Gleichverteilung folgen. Als Basis für die Zufallszahlen dient der relative Bereich für jeden Inputfaktor, wobei für jeden Faktor ganzzahlige Prozentwerte erzeugt werden. Ein Datensatz besteht aus 4 spezifischen, relativen Werten aller 4 Inputwerte. In Summe werden 10000 Datensätze erzeugt.

Ermittlung der relativen Kosten anhand der mit MCS generierten Datensätze

Mit Hilfe der 10000 Datensätze werden 10000 Beispielwerte sowohl für die relativen Kosten der Dimensionierungsgröße Personal Rohbau als auch für die relativen Kosten der Betriebsmittel Montage anhand der relativen Abhängigkeitsfunktionen ermittelt. Durch Einsetzen der 4 Inputwerte je Datensatz in die 2 Abhängigkeitsfunktionen werden die 2 relativen Kosten berechnet.

Ermittlung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten zwischen den Dimensionierungsgrößen Personal Rohbau und Betriebsmittel Montage

Nachdem für beide Dimensionierungsgrößen relative Kosten mittels der Abhängigkeitsfunktionen für 10000 mögliche Gesamtfahrzeugprojekte vorhanden sind, können diese als Input für die Berechnung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten dienen. Die Formel des Koeffizienten für die beschriebene Anwendung lautet somit:

$$r_{Pe^{RB}BM^M} = \frac{\sum_{m=1}^{10000} (Pe_m^{RB} - \overline{Pe^{RB}})(BM_m^M - \overline{BM^M})}{\sqrt{\sum_{m=1}^{10000} (Pe_m^{RB} - \overline{Pe^{RB}})^2 \sum_{m=1}^{10000} (BM_m^M - \overline{BM^M})^2}} \quad (4.9)$$

Es gilt außerdem die Symmetriebedingung nach Gleichung 2.39.

$$r_{Pe^{RB}BM^M} = r_{BM^M Pe^{RB}} \quad (4.10)$$

Für das betrachtete veranschaulichende Beispiel wird somit ein Wert von rund 0,88 für den Pearsonschen Korrelationskoeffizienten zwischen Personal Rohbau und Betriebsmittel Montage berechnet. Die Korrelationsmatrix $\mathbf{Corr}(Dim)$ kann befüllt werden.

$$\mathbf{Corr}(Dim) = \begin{pmatrix} 1 & \rho_{Pe^{RB}BM^M} \\ \rho_{BM^M Pe^{RB}} & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0,88 \\ 0,88 & 1 \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Die Korrelationsmatrix dient im weiteren Berechnungsverlauf als Ausgangspunkt für die Risikoaggregation der Dimensionierungsgrößen.

4.4.3 Ermittlung von Kosten und Risiken am veranschaulichenden Beispiel

Definition der Erwartungswerte und Risiken

Wird für die gegebenen Dimensionierungsgrößen ein fiktives Fahrzeugprojekt angenommen, ermitteln beispielsweise die Experten mit ihren Kalkulationsmethodiken einen Erwartungswert der Kosten für die Dimensionierungsgröße Personal Rohbau $E(P^{RB})$ von 100.000€ und für die Betriebsmittel Montage Kosten $E(BM^M)$ von 250.000€. Zusätzlich werden die Unsicherheiten beispielsweise beim Personal Rohbau mit einer Standardabweichung von 5.000€ und bei den Betriebsmitteln Montage mit 18.750€ durch die Experten quantifiziert. Die Berechnung des Erwartungswertes und Quantifizierung der Unsicherheiten befinden sich außerhalb der Systemgrenzen der Methodik und werden als Inputwerte für die weitere Berechnung verwendet.

Aggregation von Erwartungswert und Risiko

Die Erwartungswerte im Anwendungsbeispiel, $E(P^{RB})$ und $E(BM^M)$, können anhand folgender Formel zum Erwartungswert der Gesamtkosten $E(GK)$ aggregiert werden.

$$E(GK) = E(P^{RB}) + E(BM^M) \quad (4.12)$$

Der Erwartungswert der Gesamtkosten beträgt in diesem Fall 350.000 €.

Die Aggregation der Risiken basiert sowohl auf den quantifizierten Unsicherheiten als auch auf der Korrelationsmatrix $\mathbf{Corr}(Dim)$. Es kann eine Kovarianzmatrix $\mathbf{MCov}(D)$ gebildet werden, wobei an dieser Stelle die Dimensionierungsgröße Dim aus Platzgründen mit D abgekürzt wird.

$$\mathbf{MCov}(D) = \begin{pmatrix} Var(P^{RB}) & \rho_{P^{RB}BM^M} \sqrt{Var(P^{RB})Var(BM^M)} \\ \rho_{P^{RB}BM^M} \sqrt{Var(P^{RB})Var(BM^M)} & Var(BM^M) \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

$$\mathbf{MCov}(D) = \begin{pmatrix} 25000000,00 & 82167404,83 \\ 82167404,83 & 351562500,00 \end{pmatrix}$$

Das Gesamtrisiko besteht aus der Summe aller Einträge der Kovarianzmatrix. Die Varianz für das Gesamtrisiko beträgt somit rund 540,90 Mio. € beziehungsweise die Standardabweichung 23.257,20 €. Bei einer Berechnung mit unkorrelierten Risiken würde die Varianz 376,56 Mio. € beziehungsweise die Standardabweichung 19405,22 € ergeben, was im vorliegenden Fall eine deutliche Unterschätzung des Risikos bedeutet. Die Basis für die nachfolgenden Detailanalysen ist somit geschaffen.

4.5 Umsetzungsbeschreibung im Anwendungsfall

Aus Geheimhaltungsgründen können die Detailwerte der Berechnung in dieser Arbeit nicht wiedergegeben werden. In der Umsetzungsbeschreibung wird somit auf das Vorgehen und die Ergebnisse im fiktiven Anwendungsfall eingegangen.

4.5.1 Relatives Kostenfaktormodell im Anwendungsfall

Auf Basis der primären und sekundären Datenerhebung wird ein relatives Kostenfaktormodell, das den parametrischen Kostenkalkulationsmethoden zugeordnet werden kann,

für die im Anwendungsfall betrachtete Fabrik erstellt. Die qualitativen Expertenschätzungen bezüglich der Kosteneinflüsse im Zuge der Interviews werden anhand von Workshops und der sekundären Datenerhebung plausibilisiert. Die besprochenen Daten werden im Anschluss mit ihren Beziehungen in einem gemeinsamen Datenmodell abgebildet, um einen Überblick bei der Erstellung des Kostenmodells zu schaffen. Im Anschluss werden die qualitativen Bewertungen anhand der in Kapitel 3.4.2 vorgestellten Ratingskala in quantitative übertragen. Das Kostenmodell besteht aus einer Matrix von 97 Inputgrößen In und 58 Detaildimensionierungsgrößen $DDim$, die zur Einflussmatrix $MEf(Ef)$ mit 97 Inputgrößen und 8 Dimensionierungsgrößen Dim unter Berücksichtigung von deren Abhängigkeiten verdichtet wird. Als Inputgrößen können beispielsweise die Jahresstückzahl, Anzahl der Türen des Fahrzeuges und Anzahl der Teile im Rohbau genannt werden, während Detaildimensionierungsgrößen beispielsweise die Linienarbeiter und die Instandhaltungsarbeiter des Gewerks Montage sind. Abschließend wird die relative Einflussmatrix $MEf_{relativ}$ in der Dimension 97 x 8 ermittelt, indem die einzelnen Einflussfaktoren durch die Gesamtsumme der Absolutwerte der Einflussfaktoren je Dimensionierungsgröße dividiert werden.

4.5.2 Monte-Carlo-Simulation zur Korrelationsanalyse im Anwendungsfall

Im nächsten Schritt werden die möglichen Grenzen jeder Inputgröße ermittelt. Beispielsweise kann für eine bestehende Fabrik anhand einer Flaschenhalsanalyse bestimmt werden, welche Stückzahl an Fahrzeugen im Jahr maximal produziert werden kann. Die Minimalgrenze wird durch die Strategie des Unternehmens vorgegeben. Diese Bewertung geht hierbei von einem Beispielfahrzeug aus, das Durchschnittswerte der Produktion repräsentiert. Alle Grenzen der Inputgrößen werden relativ zu diesem Fahrzeug bestimmt. Ist die Stückzahl beim Beispielfahrzeug mit 20000 Fahrzeugen festgelegt und können maximal 50000 in der Fabrik produziert werden, dann liegt die obere Grenze bei 250 Prozent.

Die Definition der Grenzen aller Inputgrößen dient als Randbedingung für die Monte-Carlo-Simulation, die auf Basis der relativen Einflussmatrix $MEf_{relativ}$ und mit zufälligen, relativen Werten der Inputgrößen durchgeführt wird, wobei die Zufallszahlen innerhalb der definierten, relativen Grenzen auf der Basis einer Gleichverteilung erzeugt werden. Über diese MCS werden 10000 Dimensionierungen der Gesamtfabrik ermittelt, wobei jeweils relative Ergebnisse für 8 Dimensionierungsgrößen berechnet werden. Anhand dieser Stichproben können für alle Dimensionierungsgrößenpaare die Pearsonschen Korrelationskoeffizienten $r_{Dim_i Dim_j}$ berechnet werden, die gemeinsam die Korrelationsmatrix **Corr** mit der Dimension 8 x 8 ergeben. Die Korrelationskoeffizienten können der Größe nach in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt werden, das eine erste Übersicht über die linearen Abhängigkeiten in der Fabrik gibt (vgl. Abbildung 4.4, wobei nur die größten 16 Korrelationskoeffizienten aus Übersichtlichkeitsgründen dargestellt sind).

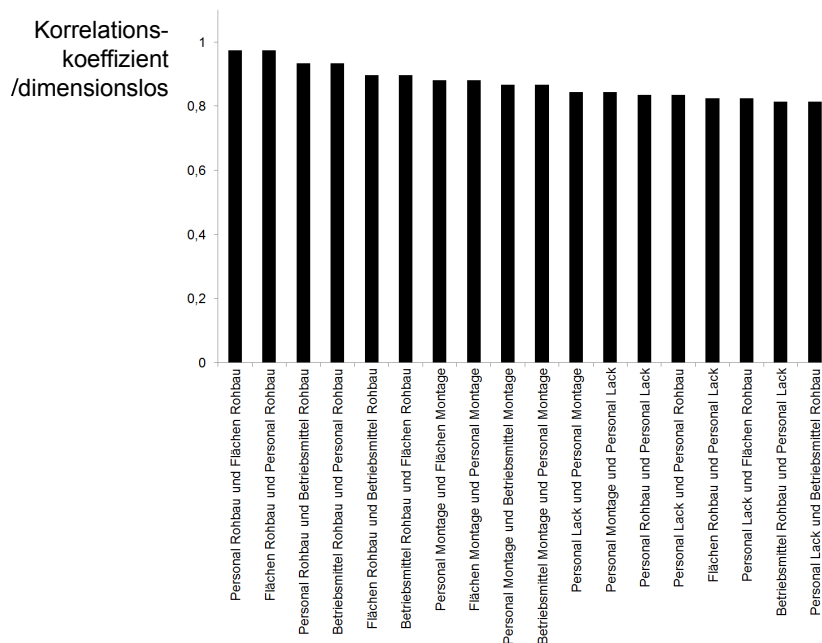


Abb. 4.4: Auswertung der Korrelationskoeffizienten (größer als 0,8 und unter Ausschluss der Koeffizienten bei den Varianzen) anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls

Im vorliegenden Fall existieren die drei größten Korrelationen bei den Dimensionierungsgrößen Personal Rohbau mit Flächen Rohbau, Personal Rohbau mit den Betriebsmitteln Rohbau und Flächen des Rohbaus mit den Betriebsmitteln des Rohbaus. Es kann somit die Aussage getroffen werden, dass alle Werte des Rohbaus sehr stark miteinander korrelieren, das die Vermutung nahe legt, dass ein spezifischer Inputfaktor alle drei besonders stark beeinflusst. Weitergeführte Analysen zeigen, dass alle drei Größen in hohem Maß von der Stückzahl abhängig sind.

4.5.3 Ermittlung von Kosten und Risiken im Anwendungsfall

Nach Ermittlung der Korrelationen für die Gesamtfabrik im allgemeinen Fall werden die Erwartungswerte für die Dimensionierungsgrößen der einzelnen Gewerke sowie deren Risiko für ein spezifisches Fabrikplanungsprojekt definiert. Die Risiken bestehen aus den quantifizierten Unsicherheiten in diesem spezifischen Anwendungsfall. Die Erwartungswerte der Gewerke werden außerhalb der Systemgrenzen von Experten mit deren Kalkulationsmethodiken berechnet und dienen als Inputwert für das vorliegende Modell.

Unsicherheitsquantifizierung

Die Unsicherheit je Dimensionierungsgröße wird in Prozent des Erwartungswertes jeder Größe definiert, wobei für diese Quantifizierungstätigkeit eine Eingabemaske für die Planer vorhanden ist. Nach der Quantifizierung können über die in dieser Arbeit getroffene Definition des Risikobereichs die Standardabweichung σ sowie die Varianz Var für jeden Dimensionierungswert berechnet werden. Für den Anwendungsfall werden die fiktiven Unsicherheiten mit 8 Varianzen quantifiziert. Über die Darstellung der Größe der Varianzen in einem gemeinsamen Vergleich kann analysiert werden, welche Dimensionierungsgrößen mit dem größten Risiko beaufschlagt sind, wie in Abbildung 4.5 ersichtlich ist.

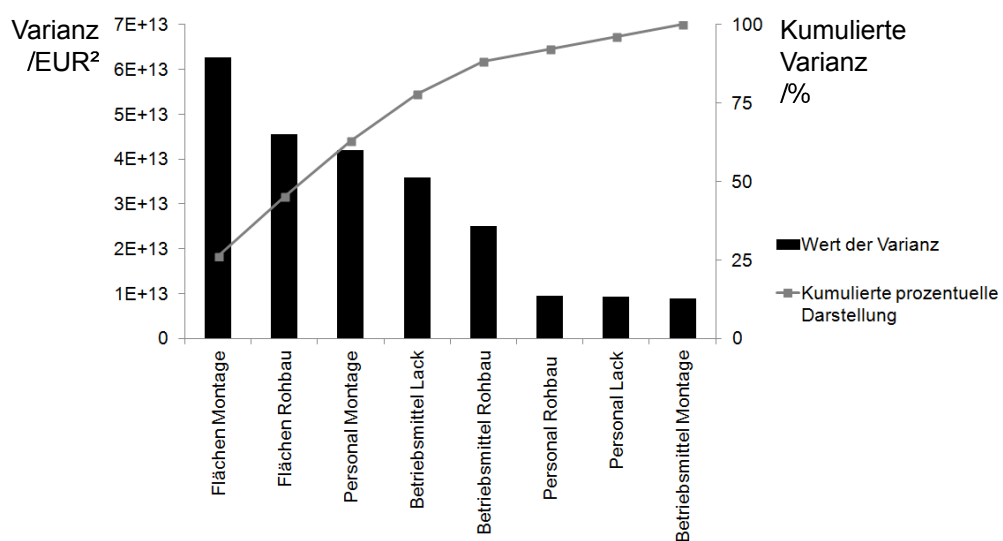


Abb. 4.5: Auswertung der Varianzen anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls

In diesem fiktiven Beispiel besitzen die vier Größen Fläche Montage, Fläche Rohbau, Personal Montage und Betriebsmittel Lack bereits 80 Prozent des Gesamtwertes des Risikos, wenn nicht auch Korrelationen bei der Gesamtrisikoagregation zu tragen kommen. Dennoch üben diese 4 Werte auch auf die Risikoaggregation mit Korrelationen aufgrund der direkten Abhängigkeit der betroffenen Kovarianzen einen erheblichen Einfluss aus. Im Zuge einer Risikominimierung wird in diesem Fall empfohlen, diese 4 Werte zuerst zu betrachten.

Aufbau einer Kovarianzmatrix

Durch die vorhandenen Varianzen und die Korrelationsmatrix kann eine Kovarianzmatrix **MCov** mit der Dimension 8 x 8 aufgebaut werden. Für alle Kombinationsmöglichkeiten der Dimensionierungsgrößen untereinander wird die Kovarianz aus dem Korrelationskoeffizienten und den beiden Varianzen gebildet. Somit ist das Kernstück für die Risikoaggre-

gation vollständig vorhanden. Die Kovarianzen können wieder in einer Paretodarstellung gemeinsam analysiert werden, wie in Abbildung 4.6 ersichtlich ist. Hierbei werden aus Übersichtlichkeitsgründen nur die 18 größten Kovarianzen abgebildet.

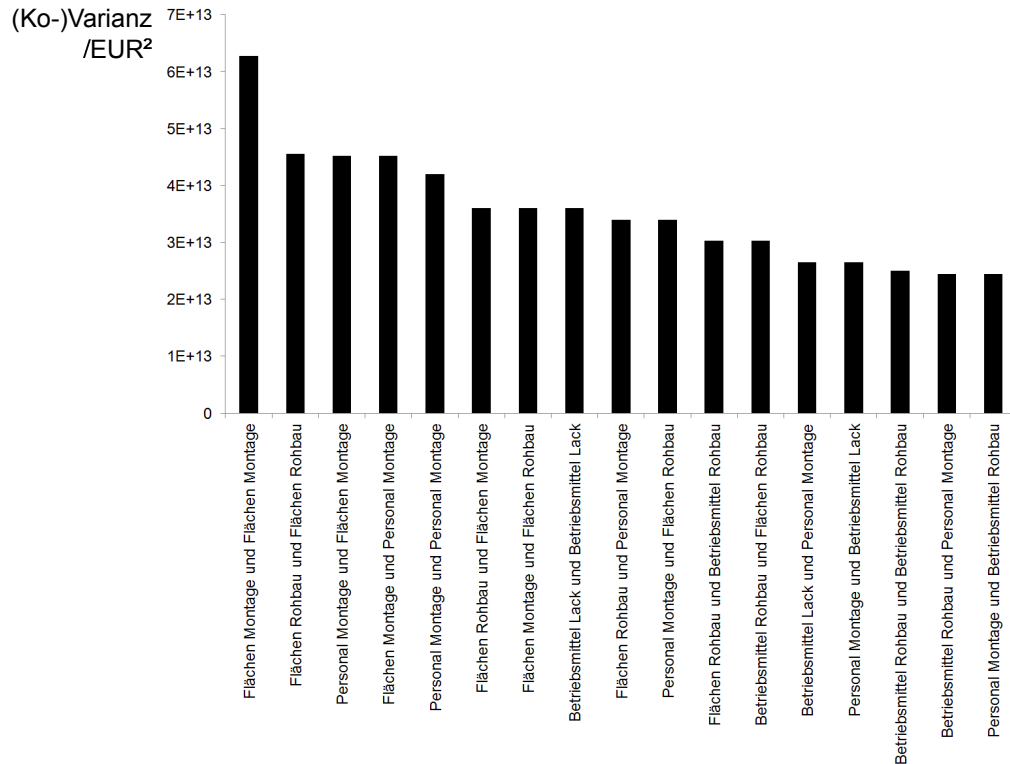


Abb. 4.6: Auswertung der 18 größten (Ko-)Varianzen anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls

Anhand dieser Darstellung sind die Haupteinflussnehmer auf das Gesamtrisiko ersichtlich. Neben den sehr hohen Varianzen bei den Größen Flächen Montage, Flächen Rohbau und Personal Montage treten ebenfalls hohe Kovarianzen bei den Dimensionierungsgrößenpaaren Personal Montage und Flächen Montage sowie Flächen Rohbau und Flächen Montage auf. Es wird deutlich, dass eine Aussage über die Haupteinflussnehmer nur anhand einer vollständig berechneten Kovarianzmatrix möglich ist, da die Kovarianzen nur in Kombination aller Korrelationskoeffizienten und Varianzen ermittelt werden können. Die Unsicherheiten bei der Dimensionierungsgröße Flächen Montage bieten in diesem Fall eine erste Möglichkeit zur Analyse von weiterführenden Tätigkeiten, die das Gesamtrisiko wesentlich reduzieren können.

In der normierten Varianz-Kovarianzmatrix für die Dimensionierungsgröße Flächen Montage sind die Kovarianzen der korrelierenden Dimensionierungsgrößen von Flächen Montage eingezeichnet, um in einem Überblick feststellen zu können, auf welche Werte die Reduktion der Varianz Auswirkung besitzt. Tritt der Fall auf, dass viele der Kovarianzen ebenfalls hohe Werte haben, kann das Gesamtrisiko durch Reduktion der Unsicherheit von der betrachteten Dimensionierungsgröße stärker verringert werden, als wenn die be-

trachteten Kovarianzen nur gering sind. Aus diesem Grund kann sich eine Erhöhung der Planungstätigkeiten in einem solchen Fall günstig auswirken.

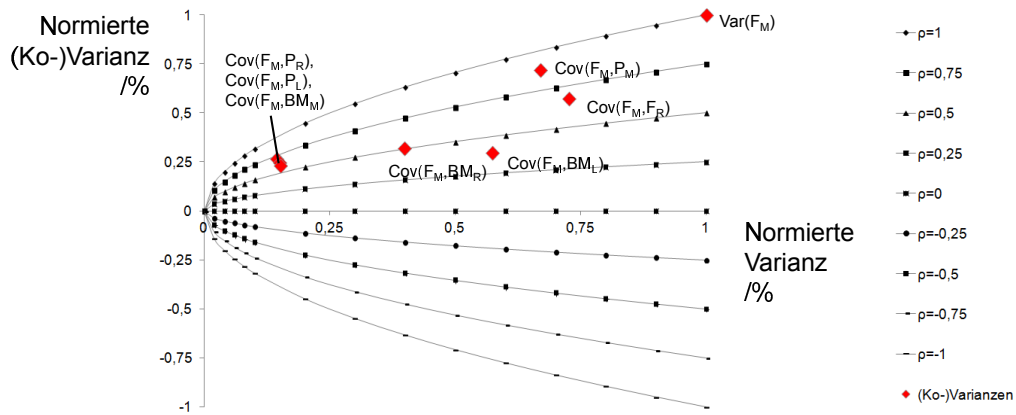


Abb. 4.7: Darstellung der normierten Varianz-Kovarianzmatrix mit allen Kovarianzen, die mit der Dimensionierungsgröße Flächen Montage F_M in Verbindung stehen, anhand des Anwendungsfalls

Aggregation der Gesamtkosten und des Gesamtrisikos

Anhand der Summe aller Erwartungswerte und der Summe der gesamten Einträge der Kovarianzmatrix kann sowohl der Erwartungswert der Gesamtkosten als auch das Gesamtrisiko berechnet werden. Die Werte werden in einer Risikoübersicht im nächsten Kapitel zusammengefasst.

4.5.4 Risikoübersicht im Anwendungsfall

Im vorliegenden Fall beträgt der Erwartungswert $E(GK)$ der Gesamtkosten 708,24 Mio. € mit einer Standardabweichung von rund 35,84 Mio. €, wie in Tabelle 4.2 ersichtlich ist. Außerdem werden in dieser Tabelle verschiedene Quantile der Verteilung angegeben, um bei der Preisfindung das damit verbundene Risiko einschätzen zu können. Liegt beispielsweise der gewählte Preis P_A bei 740 Mio. €, dann wird das Risiko, dass die Kosten diesen Preis übersteigen, im gegenständlichen Fall mit rund 18,78 Prozent beziffert. Um dieses Risiko auf 5 Prozent zu senken, müsste der Preis um rund 27,19 Mio. € auf 767,19 Mio. € erhöht werden.

In Tabelle 4.3 werden Ergebnisse des VaR explizit ausgewiesen. Einerseits wird hierbei der VaR für einen spezifischen Risikowert ermittelt und andererseits das Risiko für einen definierten VaR. In Abbildung 4.8 wird dieser VaR anhand der Dichtefunktion des Gesamtrisikos dargestellt.

Größe	Wert	
Erwartungswert $E(GK)$	708,24 Mio. €	
Standardabweichung σ	35,84 Mio. €	
Wahrscheinlichkeitsbereich α	Wahrscheinlichkeitsbereich β	Wert ξ_α
Wahrscheinlichkeit des Unterschreitens	Wahrscheinlichkeit des Überschreitens	VaR bei α
99 %	1 %	791,61 Mio. €
95 %	5 %	767,18 Mio. €
90 %	10 %	754,17 Mio. €
85 %	15 %	745,38 Mio. €
80 %	20 %	738,40 Mio. €
75 %	25 %	732,41 Mio. €
70 %	30 %	727,03 Mio. €
Wahrscheinlichkeitsbereich α	Wahrscheinlichkeitsbereich β	gewählter Preis P_A
81,22 %	18,78 %	740,00 Mio. €

Tab. 4.2: Überblick über die Risikobereiche des Anwendungsfalls

Größe	Wert
Erwartungswert $E(GK)$	708,24 Mio. €
Standardabweichung σ	35,84 Mio. €
VaR für P_A mit der Risikogrenze $\xi_{0,99}$	791,61 Mio. €
Beispiel A: Verhandlungspreis P_A	740,00 Mio. €
Wahrscheinlichkeit, dass Kosten eintreten, die niedriger als P_A sind	rund 81,22 %
Wahrscheinlichkeit, dass Kosten eintreten, die höher als P_A sind	rund 18,78 %

Tab. 4.3: Ermittlung des VaR im Anwendungsfall

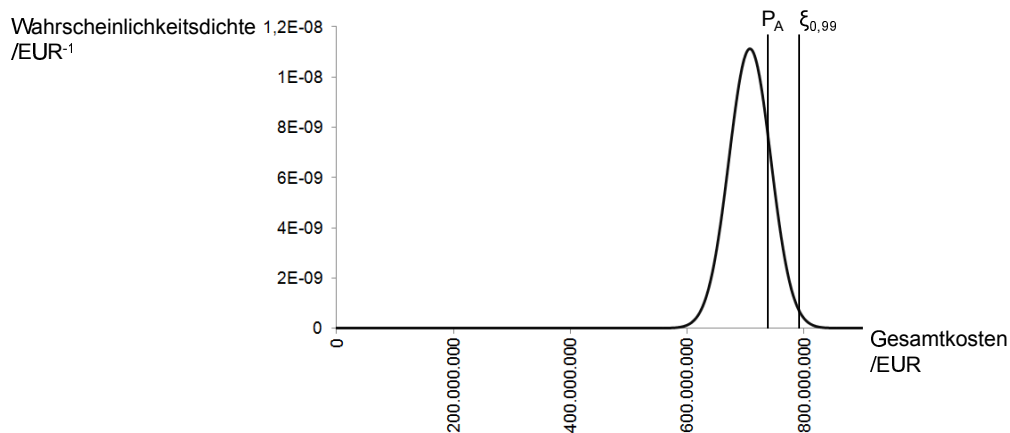


Abb. 4.8: Darstellung des VaR zur Auswertung des Risikos anhand des Anwendungsfalls

Abschließend wird in der Abbildung 4.9 das Potential zur Preisreduktion im Zuge einer Risikoerhöhung dargestellt. Befindet sich der Preis beim Risiko von einem Prozent, bedeutet es in diesem Fall, er beträgt rund 791,61 Mio. €. Der Preis kann um rund 4,7 Prozent reduziert werden, wenn das Risiko gleichzeitig auf 10 Prozent erhöht wird. Das bedeutet im vorliegenden Fall einen Preis von rund 754,17 Mio. €, was auch durch Tabelle 4.2 bestätigt wird. Das Potential zur Preisreduktion wird jedoch immer geringer, je weiter man sich dem Wert mit 50 Prozent Risiko, also dem Erwartungswert, annähert. Ab der 50 Prozent-Marke steigt das Preisreduktionspotential wieder an, obwohl die Risikobeträge mit größer als 50 Prozent eine sehr risikofreudige Einstellung voraussetzen. Die größten Preisreduktionspotentiale bei gleichzeitig moderatem Risikoanstieg existieren somit im Randbereich der Glockenkurve.

4.6 Zwischenfazit

Das Ziel des Anwendungsfalls mit der Abbildung der wertschöpfenden Kernbereiche einer Fabrik für Gesamtfahrzeuge ist das Zeigen der Funktionalität und Umsetzbarkeit anhand eines realen Beispiels. Ein europäischer Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen bietet die Grundlagen für diesen Anwendungsfall. Auf Basis einer primären Datenerhebung anhand von Experteninterviews und einer sekundären anhand der Analyse von Datenbeständen ist es möglich, die Zusammenhänge der Dimensionierungen qualitativ zu definieren und in einem Datenmodell darzustellen. In weiterer Folge werden die Abhängigkeiten im relativen Kostenfaktormodell anhand einer Ratingskala quantitativ abgebildet. Aufgrund von Geheimhaltungsgründen werden in dieser Arbeit keine Details des relativen Kostenfaktormodells wiedergegeben, jedoch die Werte für einen fiktiven Dimensionierungsfall konkret weiterverwendet und für die Verifikation und Validierung zur

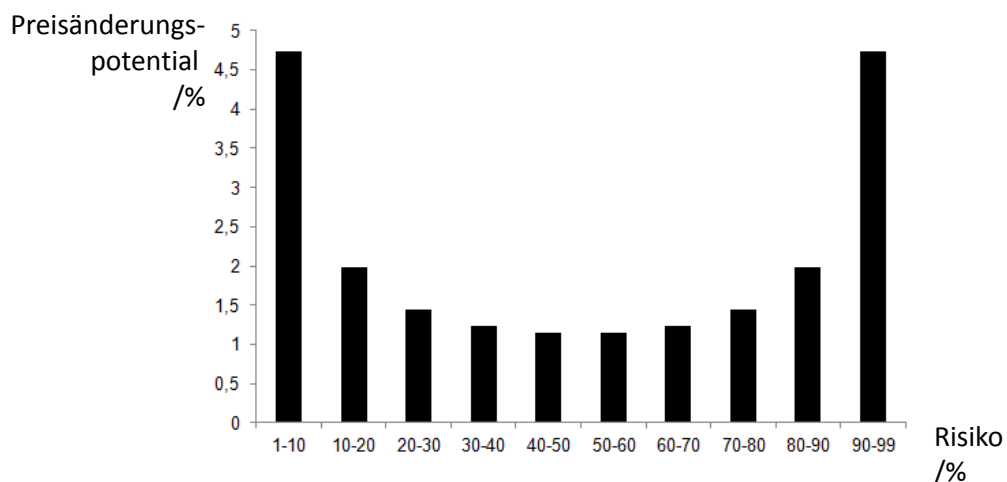


Abb. 4.9: Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikohöherung im Anwendungsfall mit dem Erwartungswert von 708,24 Mio. € und der Standardabweichung von rund 35,84 Mio. €

Verfügung gestellt.

Ausgehend von der Bildung des relativen Kostenfaktormodells für eine spezifische Fabrik in einer Brownfield-Betrachtung besteht die Möglichkeit, über eine Monte-Carlo-Simulation Stichprobenwerte für die Dimensionierung der Fabrik zu generieren. Den Output der MCS stellen hierbei die Dimensionierungsgrößen Personal, Flächen und Betriebsmittel der Fabrik dar, die im betrachteten Fall in die Gewerke Rohbau, Lack und Montage als Kernbereiche der Automobilproduktion unterteilt werden. Unterstützende Bereiche sowie in der Wertschöpfungskette vorgelagerte Teileproduktionen, wie beispielsweise im Presswerk, finden im Anwendungsfall keine Berücksichtigung. Auf Basis der definierten Kernbereiche, welche die Produktion der betrachteten Fabrik maßgeblich beeinflussen, wird die Risikoaggregation beispielhaft dargestellt, wobei eine Erweiterung der noch ausgelassenen Bereiche mit derselben Methodik möglich ist.

Anhand des Anwendungsfalls kann die vollständige Umsetzung der in dieser Arbeit entwickelten Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung gezeigt werden. Unsicherheiten werden quantifiziert, Korrelationen berechnet und bei der Risikoaggregation berücksichtigt. Vielfältige Werkzeuge zur Risikoanalyse stehen im Anschluss zur Verfügung, um den Experten einerseits einen Überblick über das Gesamtrisiko zu geben und um andererseits auch eine Detailanalyse durchführen zu können. Mithilfe der Verifikation und Validierung soll im nächsten Schritt überprüft werden, ob das Berechnungsmodell korrekt umgesetzt ist und welche Anforderungen an die Methodik erfüllt werden.

5 Verifikation und Validierung

5.1 Vorgehensweise zur Verifikation des mathematischen Modells und der Methodik

Verifikation und Validierung sind ein unverzichtbarer Bestandteil bei der Methodikentwicklung von Simulationen und Berechnungen. Jedoch muss beachtet werden, dass zwar die Möglichkeit von fehlerhaften Aussagen und Schlussfolgerungen durch eine fundierte Verifikation und Validierung reduziert wird, aber eine vollständige Korrektheit eines Berechnungsmodells selten nachgewiesen werden kann. Zusätzlich muss neben der Korrektheit auch die Eignung für die spezifische Anwendung überprüft werden. (vgl. Rabe et al. (2008, S. 1))

Wird infolge des Induktionsschlusses vom Einzelnen auf das Ganze geschlossen, wie im Zuge der Entwicklung der vorliegenden Methodik anhand eines Anwendungsfalls auf Fabrikplanungen im Allgemeinen, dann muss für Verifikationsergebnisse beachtet werden, dass eine Verifikation auf Basis von Stichprobendaten für die Grundgesamtheit nur eingeschränkt möglich ist und eine Falsifikation niemals mit Sicherheit ausgeschlossen werden kann (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 18)). Rabe et al. (2008, S. 14 ff.) definiert dabei die Verifikation als die regelmäßige Überprüfung von Phasenergebnissen auf ihre Korrektheit, während die Validierung eine Überprüfung des Gesamtmodells auf die Übereinstimmung mit dem realen Verhalten darstellt. In der vorliegenden Arbeit wird diese Definition übernommen.

Bei der Validierung von Risikoanalysen ist generell zu beachten, dass dies keinen geradlinigen Prozess darstellt, nachdem von Natur aus eine objektive Risikomessung nicht existiert (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 10)). Dennoch können die mathematische Abbildung des Modells innerhalb der Grenzen der Verifikation bestätigt und die Beschreibung sowie Güte der Modellierung überprüft werden.

In Abbildung 5.1 wird das Vorgehen zur Verifikation und Validierung in einem Überblick dargestellt.

In der Methodik werden zwei mathematische Modelle verwendet. Zum einen existiert ein relatives Kostenfaktormodell, um Stichprobenwerte zu erzeugen, mit denen in weiterer Folge die Korrelationskoeffizienten berechnet werden. Zum anderen werden die als

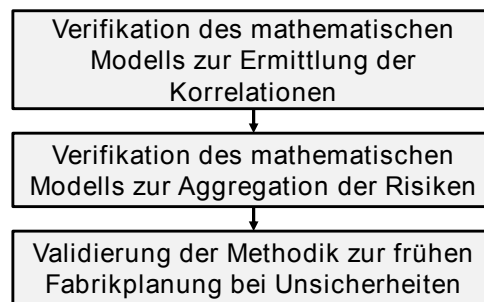


Abb. 5.1: Überblick über die Vorgehensweise zur Verifikation und Validierung der Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten

Normalverteilung quantifizierten Risiken mithilfe eines mathematischen Modells zur Berücksichtigung der Korrelationen aggregiert.

Das Vorgehen zur Ermittlung der Korrelationen mithilfe eines relativen Kostenfaktormodells wird anhand von Beispieldaten vergangener, realer Angebote für Gesamtfahrzeugproduktionen verifiziert. Dieses Kostenmodell beinhaltet mehrere Schritte der Verbesserung, um es an die spezifischen Bedingungen im konkreten Anwendungsfall anzupassen. Eine Kalibrierung des Modells auf Basis von historischen Daten wurde somit durchgeführt. Aus Geheimhaltungsgründen werden die konkreten Daten der Angebote im vorliegenden Dokument weder wiedergegeben noch deren Hintergründe diskutiert. Falls Daten in einem Scatterplot dargestellt werden, erfolgt keine Abbildung von Absolutwerten. Im Mittelpunkt der Verifikation steht die Korrelationsmatrix. Generell muss dem Leser bewusst sein, dass die realen Daten kundenspezifische Aufbereitungen und Preisentscheidungen beinhalten, die auch die Korrelationen und die errechneten Kosten beeinflussen. Jedoch werden diese Hintergründe aus Geheimhaltungsgründen nicht dargelegt.

Die Verifikation der Aggregation der Risiken wird anhand von Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierbei werden die Auswirkungen verschiedener Extremwerte sowie Ausprägungen untersucht.

Die Validierung der Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten unter Verwendung eines mathematischen Modells wird anschließend anhand eines Fahrzeugprojektes durchgeführt und stellt die Eignung der Methodik in den Mittelpunkt der Betrachtung. Das Fahrzeugprojekt basiert dabei auf der realen Fabrik des europäischen Auftragsfertigers, verwendet dessen Korrelationen der Dimensionierungsgrößen, enthält aber aufgrund der Geheimhaltung veränderte Werte der Dimensionierungsgrößen, die jedoch keine Auswirkungen auf die Funktionalitäten der Methodik besitzen. Trotz dieser Veränderung ist eine Überprüfung der Funktionalitäten an diesem Beispiel möglich. Hierbei werden die in Kapitel 2.4.3 allgemein formulierten und in Kapitel 3.2 detaillierten Anforderungen mit den Möglichkeiten der Methodik anhand eines Demonstrators überprüft. Abschließend wird auf die Beantwortung der anfangs gestellten Forschungsfragen eingegangen.

5.2 Verifikation der mathematischen Teilmodelle

5.2.1 Verifikation der Korrelationskoeffizienten

Im Anhang werden in Tabelle A.1 die Korrelationskoeffizienten dargestellt, die anhand von errechneten Stichprobenwerten durch das relative Kostenfaktormodell sowie durch historische Daten ermittelt wurden. Aufgrund der Vielzahl der Korrelationskoeffizienten wird im Folgenden nur auf die Besonderheiten und deren Analyseergebnisse eingegangen.

Tests beim Korrelationskoeffizienten

Die Korrelationskoeffizienten r von Stichproben ergeben einen Schätzwert für die jeweiligen Korrelationskoeffizienten ρ der Grundgesamtheit. Im ersten Schritt kann die Hypothese $\rho = 0$ getestet werden, ob diese zutrifft oder verworfen wird. Das Vorgehen wird nach dem t-Test nach Fisher durchgeführt (vgl. Kreyszig (1979, S. 316 f.) und Fisher (1915, S. 507)). Werden für alle Korrelationskoeffizienten gleich viele Stichproben und dieselbe Signifikanzzahl α verwendet, dann kann ein genereller Wert für den Korrelationskoeffizienten ermittelt werden, der den Grenzwert definiert, ab dem die Hypothese $\rho = 0$ verworfen werden kann. Der Fall der Signifikanzzahl $\alpha = 5$ Prozent und 10000 Stichproben ergibt den Grenzwert für den Korrelationskoeffizienten von rund $\pm 0,01650$. Das bedeutet, wird ein kleinerer Korrelationskoeffizient als $0,01650$ beziehungsweise ein größerer als $-0,01650$ berechnet, dann kann $\rho = 0$ nicht verworfen werden.

Die realen Daten vergangener Angebote enthalten jedoch eine unterschiedliche Anzahl von Stichproben, da nicht immer alle Dimensionierungsgrößen in jedem Angebot notwendig waren. Die minimale Anzahl beinhaltet dabei 11 Proben und die maximale 15. Jedoch kann festgestellt werden, dass für die betrachtete Produktion von Gesamtfahrzeugen generell hohe Korrelationen vorherrschen. Dies untermauert die These von Gleißner (2001, S. 125) an diesem Beispiel der Fabrikplanung, dass eine Vernachlässigung der Korrelationen zu einer Unterschätzung des Gesamtrisikos führt. Gerade bei vielen stark positiven Korrelationen führt dies in weiterer Folge zu einer starken Vergrößerung des aggregierten Gesamtrisikos. Der minimale Korrelationskoeffizient der empirischen Daten $r_{P_L B M_M}$, der die Abhängigkeit zwischen dem Personal Lack und den Betriebsmitteln Montage beschreibt, besitzt den Wert $0,4594$ bei einer Stichprobenanzahl von 13. Diese Stichprobenanzahl definiert den Bereich des Korrelationskoeffizienten von $\pm 0,4770$, in dem eine Korrelation von 0 nicht ausgeschlossen werden kann. Nachdem der ermittelte Koeffizient in diesen Bereich fällt, kann somit die Hypothese einer Korrelation von 0 mit einer Signifikanz von 95 Prozent nicht verworfen werden. Bei allen anderen Dimensionierungsgrößen kann eine Korrelation von 0 ausgeschlossen werden.

Grenzbereich	Korrelationskoeffizient	Wert des historischen Korrelationskoeffizienten	Grenze der signifikanten Korrelation
Minimal	$r_{P_R B M_R}$	0,70	+/-0,4407
Maximal	$r_{F_R B M_L}$	0,77	+/-0,5208
Maximal	$r_{F_R F_M}$	0,80	+/-0,5208
Maximal	$r_{P_L F_M}$	0,75	+/-0,5208
Maximal	$r_{B M_L F_M}$	0,62	+/-0,5208

Tab. 5.1: Minimale und maximale Grenzbereiche der signifikanten Korrelation bei den historischen Daten und einem Signifikanzniveau von 95 Prozent

Es wird gezeigt, dass eine Verifizierung mit nur wenigen Daten, wie im vorliegenden Fall, eine Herausforderung darstellt. Da laut Touran (1993, S. 64) ein Korrelationskoeffizient mit dem Wert 0,45 als gemäßigt definiert wird und mit 0,15 als schwach, kann angenommen werden, dass für gemäßigte sowie schwache Koeffizienten mit nur 11 Proben eine Korrelation von 0 mit einer 95-prozentigen Signifikanz nicht ausgeschlossen werden kann.

In Tabelle 5.1 wird eine Übersicht über den maximalen und minimalen Grenzbereich der signifikanten Korrelation bei den historischen Daten gegeben, wobei der maximale Grenzbereich bei vier Korrelationskoeffizienten vorkommt.

Aufgrund des sehr hohen Aufwandes, Angebotskalkulationen für Gesamtfahrzeuge durchzuführen, können jedoch im Zuge dieser Verifikation nicht mehr Stichprobenwerte ermittelt werden. Aus diesem Grund beschränkt sich die Verifikation der jeweiligen Korrelationen auf Werte, die in Abhängigkeit der Stichprobenanzahl als signifikant betrachtet werden können. Im Anhang in Tabelle A.2 werden die Korrelationskoeffizienten der historischen Daten mit den berechneten Daten des relativen Kostenfaktormodells dargestellt, wobei auch die Stichprobenanzahl der historischen Daten und der Grenzbereich des signifikanten Koeffizienten angegeben wird. Erhält die ermittelte Korrelation einen Wert, der sich in diesem Grenzbereich befindet, dann kann die Hypothese, dass keine Korrelation vorherrscht, nicht ausgeschlossen werden.

Im vorliegenden Fall kann, mit einer Ausnahme, sowohl bei den errechneten Werten als auch bei den historischen Daten bei jedem Korrelationspaar die Hypothese $\rho = 0$ widerlegt werden. Lediglich beim Korrelationskoeffizienten $r_{P_L B M_M}$ der historischen Daten kann eine Korrelation von 0 nicht ausgeschlossen werden, wobei jedoch die Berechnung eine signifikante Korrelation ergibt. Aufgrund der weiten Grenzen der signifikanten Korrelation, die durch die relativ geringe Stichprobenanzahl ausgelöst wird, kann an dieser Stelle keine eindeutige Aussage getroffen werden. Es existieren somit bei 96,43 Prozent der Dimensionierungsgrößenpaare signifikante Korrelationen bei einem 95-prozentigen

Datensatz	Intervallgröße	Korrelationskoeffizient	Wert des Korrelationskoeffizienten	Konfidenzintervallgröße
berechnet	Minimal	$r_{P_R F_R}$	0,97	0,002318
berechnet	Maximal	$r_{B M_L F_M}$	0,39	0,03324
historisch	Minimal	$r_{P_L P_M}$	0,97	0,09117
historisch	Maximal	$r_{P_L B M_M}$	0,46	0,9285

Tab. 5.2: Minimale und maximale Konfidenzintervalle bei den historischen Daten für eine Konfidenz von 95 Prozent

Signifikanzniveau. Bei den historischen Daten werden trotz der geringen Anzahl bei nur einem einzigen Wert eine höhere Stichprobenanzahl benötigt, um die Hypothese $\rho = 0$ widerlegen zu können, die jedoch für diese Arbeit nicht zur Verfügung steht.

Konfidenzintervall des Korrelationskoeffizienten

Für jeden Korrelationskoeffizienten kann ein Konfidenzintervall ermittelt werden, in dem sich der jeweilige Koeffizient mit 95-prozentiger Konfidenz befindet. Hierfür wird die Fishersche Z-Transformation durchgeführt (vgl. Bortz & Döring (2006, S. 610 f.), Kreyszig (1979, S. 317 f.) und Fisher (1921, S. 3 ff.)). Im Anhang in Tabelle A.3 werden die Konfidenzintervalle der Korrelationskoeffizienten bei den historischen Daten angeführt. Bei den berechneten Stichprobenwerten ergibt sich ein maximales Konfidenzintervall von 0,03324 beim Wert $r_{B M_L F_M}$. Gleichzeitig zeigt dieses relativ kleine Konfidenzintervall, dass mit einer Stichprobenanzahl von 10000 Werten Korrelationskoeffizienten schon sehr exakt bestimmt werden können. Nachdem die gesamte Simulation auf die Ermittlung dieser Koeffizienten abzielt, kann die Stichprobenanzahl somit auf 10000 begrenzt werden. Eine Simulation mit 10000 Werten ist beispielsweise in Microsoft® Office Excel® als Softwaretool möglich und wird in dieser Verifikation verwendet.

In Tabelle 5.2 werden die maximalen und minimalen Werte der Konfidenzintervallgröße für die berechneten und historischen Werte in einem Überblick dargestellt. Die Auswirkung der Stichprobenmenge ist aufgrund der Größenunterschiede zwischen den berechneten und historischen Datensätzen eindeutig zu erkennen. Die historischen Konfidenzintervalle befinden sich in einem Bereich, dessen Größenordnung um circa eine Zehnerpotenz geringer ist als die berechneten.

Bei lediglich vier Korrelationskoeffizienten tritt keine Überschneidung der Konfidenzintervalle bei einer Konfidenz mit 95 Prozent auf. Bei den restlichen circa 85,71 Prozent aller Koeffizienten überlagern sich die Bereiche. Das bedeutet, dass für diese Korrelationskoeffizientenpaare anhand des Berechnungsmodells Korrelationen ermittelt werden können, die sich mit der Konfidenz von 95 Prozent im Bereich der Werte der historischen Daten bewegen. Bei den restlichen muss festgestellt werden, dass die Korrelationskoeffizienten

bei Berechnung und historischen Daten andere Wertebereiche ergeben, deren Konfidenzintervalle keine Gemeinsamkeiten bieten. Das resultiert zum einen aus der geringen Anzahl der historischen Daten, die zusätzlich im Zuge des Angebotsprozesses und deren Abstimmungsrunden einer nicht dokumentierten Veränderung ausgesetzt waren. Zum anderen werden im relativen Kostenfaktormodell Vereinfachungen getroffen, die sowohl Auswirkungen auf die einzelnen Dimensionierungsgrößen als auch auf deren Korrelationen verursachen. Dennoch stellt eine Überschneidung in 85,71 Prozent der Fälle einen Erfolg für das verwendete Kostenfaktormodell dar.

Vergleich der einzelnen Korrelationen des relativen Kostenfaktormodells mit den historischen Daten

In dieser Arbeit werden primär Auswirkungen auf die Gesamtrisik aggregierung betrachtet. Diese Abweichungen im Gesamtrisiko werden durch mögliche Unterschiede der Korrelationskoeffizienten, die auf Basis des relativen Kostenfaktormodells ermittelt wurden, zu den Koeffizienten auf Basis der historischen Daten verursacht. Hierfür werden Sensitivitätsanalyse und Grenzwerttests im Zuge von Kapitel 5.2.2 durchgeführt, um verschiedene Extremfälle und Kombinationsmöglichkeiten analysieren zu können.

In diesem Kapitel werden die einzelnen Koeffizienten miteinander verglichen, um im Detail die Unterschiede der einzelnen Korrelationen zu betrachten. Dieses Detailwissen ermöglicht in weiterer Folge eine Interpretation der Ursachen der Abweichung.

Zuerst werden die Werte der Korrelationskoeffizienten jeder Dimensionierungsgrößen der berechneten und historischen Daten miteinander verglichen. Die maximale Abweichung dieser berechneten Korrelationskoeffizienten von den historischen Daten beträgt rund 0,28 beziehungsweise rund 14 Prozent vom möglichen Bereich des Koeffizienten. Die minimale Abweichung kann mit rund -0,25 beziehungsweise rund -12,5 Prozent vom möglichen Bereich definiert werden. In Abbildung 5.2 wird die Häufigkeit der Abweichungen in einem Histogramm dargestellt. Es ist ersichtlich, dass ein Hauptteil der absoluten Abweichungen bei mehr als 80 Prozent der Korrelationskoeffizienten zwischen -0,23 und +0,15 liegt. Abbildung 5.3 zeigt die jeweilige Differenz der berechneten Werte zu den Werten der historischen Daten anhand der Korrelationsmatrix. Sie ist farblich hinterlegt, um die Abweichungen deutlich herauszustreichen.

Im nächsten Schritt werden die Korrelationen mit dem stärksten Einflussfaktor verglichen. Als stärkster Faktor wurde von den Experten durchgängig die Stückzahl definiert und auch im relativen Modell so eingeschätzt. Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient stellt ein Maß für die lineare Abhängigkeit von zwei Parametern dar, für die Stichprobenwerte vorhanden sind. Bei den historischen Daten kann eine grundlegende Abhängigkeit der Dimensionierungsgrößen von dem Inputfaktor Stückzahl anhand einer graphischen Analyse mit Scatterplots beobachtet werden. Diese Abhängigkeit verhält sich durchgängig

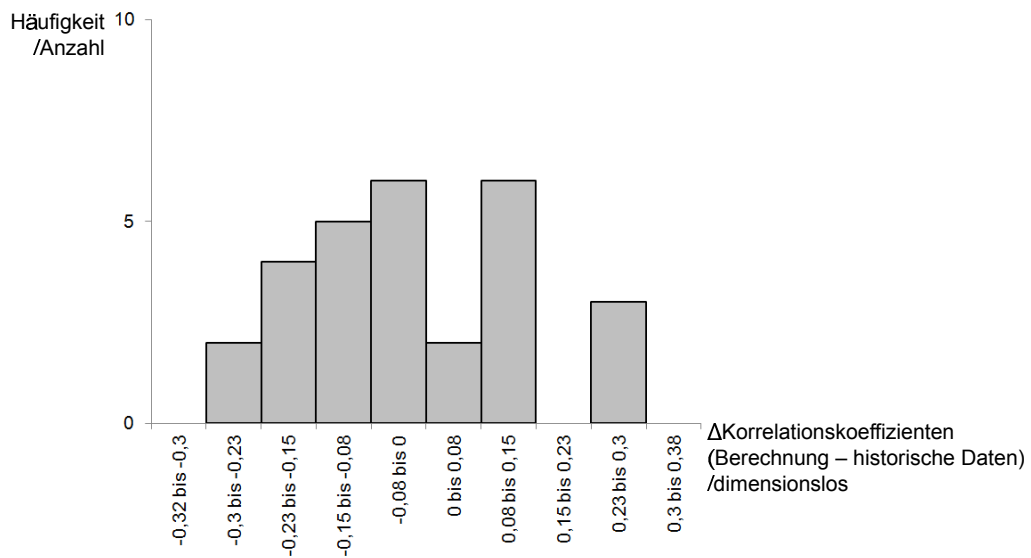


Abb. 5.2: Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen den Korrelationskoeffizienten der Berechnung und den historischen Daten

	Personal Rohbau	Flächen Rohbau	Betriebsmittel Rohbau	Personal Lack	Betriebsmittel Lack	Personal Montage	Flächen Montage	Betriebsmittel Montage
Personal Rohbau	0,00	0,09	0,24	-0,04	0,03	-0,10	-0,25	0,13
Flächen Rohbau	0,09	0,00	0,00	-0,02	-0,20	-0,15	-0,13	-0,05
Betriebsmittel Rohbau	0,24	0,00	0,00	0,10	-0,15	-0,06	-0,06	-0,10
Personal Lack	-0,04	-0,02	0,10	0,00	0,13	-0,12	-0,11	0,28
Betriebsmittel Lack	0,03	-0,20	-0,15	0,13	0,00	-0,08	-0,23	-0,16
Personal Montage	-0,10	-0,15	-0,06	-0,12	-0,08	0,00	0,09	0,26
Flächen Montage	-0,25	-0,13	-0,06	-0,11	-0,23	0,09	0,00	0,14
Betriebsmittel Montage	0,13	-0,05	-0,10	0,28	-0,16	0,26	0,14	0,00

Abb. 5.3: Differenzen der Korrelationskoeffizienten der berechneten Werte zu den historischen Daten auf Basis der Korrelationsmatrix

annähernd linear, wobei jedoch zusätzliche Größen die Korrelation in unterschiedlichem Ausmaß beeinflussen. Um die Berechnungsergebnisse mit dem relativen Kostenfaktormodell verifizieren zu können, werden die Korrelationskoeffizienten zwischen den einzelnen Dimensionierungsgrößen und den Stückzahlen (SZ) ermittelt. Sowohl bei den berechneten als auch bei den historischen Daten werden sehr hohe Korrelationen mit der Stückzahl festgestellt. Im Anhang in Tabelle A.4 werden alle Korrelationskoeffizienten der Dimensionierungsgrößen inklusive Konfidenzintervalle mit der Stückzahl der berechneten sowie historischen Werten abgebildet. Das Konfidenzintervall der berechneten Werte ergibt hierbei nur einen sehr kleinen Bereich von minimal 0,002318 und maximal 0,03324 aufgrund der hohen Stichprobenanzahl. Die Differenz der Korrelationskoeffizienten in Bezug auf die Stückzahl zwischen der Rechnung und den Daten beträgt maximal +0,21 und minimal -0,17, wie aus Tabelle A.4 hervorgeht. In 6 von 8 Fällen ergeben die Konfidenzin-

tervale der Korrelationskoeffizienten des berechneten und historischen Datensatzes hinsichtlich der Stückzahl Schnittmengen. Bei den beiden Fällen, die keine Überschneidung besitzen, ist die Differenz der Korrelationskoeffizienten eine geringe (0,09 bzw. 0,10) und gibt grundsätzlich eine gemeinsame Tendenz der Korrelation mit der Stückzahl wieder. Mit diesen Werten kann gezeigt werden, dass das relative Kostenfaktormodell tendenziell die Stückzahl als den wichtigsten Einflussfaktor berücksichtigt. Die Korrelation mit dieser liegt je nach Dimensionierungsgröße in einem Bereich von 0,54 bis 0,97, wenn die historischen Daten als Basis genommen werden.

Eine für diese Arbeit wichtige Aussage kann mit der beschriebenen Analyse getroffen werden. Experteninterviews ergaben, dass die Stückzahl eine besonders wichtige Einflussgröße auf die Dimensionierung der Fabrik darstellt und sich alle anderen Einflussgrößen im Vergleich zu dieser in einer untergeordneten Rolle befinden. Die Dimensionierungsgrößen haben ein linear ausgeprägtes Abhängigkeitsverhältnis zur Stückzahl. Dadurch kann die Linearisierung der Abhängigkeitsverhältnisse im relativen Kostenfaktormodell sowie die Verwendung des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten begründet werden. Das Verkürzungsmerkmal dieses Kostenmodells wird somit für die Anwendung der Ermittlung der Korrelationen bei frühen Fabrikplanungen verifiziert. Die spezifizierte Anwendung definiert das pragmatische Merkmal.

In Tabelle 5.3 werden Minimal-, Maximalwert, Mittelwert und Median der Korrelationskoeffizienten sowohl für die berechneten als auch historischen Datensätze mit der Stückzahl dargestellt. Generell wird dadurch gezeigt, dass sowohl bei den berechneten als auch historischen Werten alle Dimensionierungsgrößen mindestens gemäßigt positiv korrelieren und vielfach eine starke, positive Korrelation mit der Stückzahl vorherrscht. Der Mittelwert der Korrelationskoeffizienten liegt mittels Berechnung über die Fishersche Z-Transformation zwischen 0,77 und 0,79, wobei der Median in beiden Fällen knapp über den Mittelwerten liegt. Dies bestätigt ebenfalls die Anwendbarkeit des linearen Kostenfaktormodells.

Für weiterführende Überprüfungsmöglichkeiten der Korrelationsmatrizen sei beispielsweise auf Steiger (1980) oder Jennrich (1970) verwiesen, die in ihren Arbeiten spezielle Testmethoden für den Vergleich von Korrelationsmatrizen entwickelt haben. In der vorliegenden Arbeit stellt jedoch die nachfolgende Überprüfung den zentralen Schritt im Zuge der Verifikation dar. Hierbei wird überprüft, welche Auswirkungen die Verwendung der Korrelationskoeffizienten der historischen Daten sowie der berechneten Daten auf das aggregierte Gesamtrisiko von Fabrikplanungsfällen haben. Ebenfalls wird eine Sensitivitätsanalyse bezüglich der Konfidenzintervallgrenzen der historischen Daten auf das Gesamtrisiko durchgeführt.

Datensatz	Wert	Wert des Korrelationskoeffizienten	Dimensionierungsgröße
berechnet	Minimalwert	0,67	Fläche Montage
berechnet	Maximalwert	0,95	Personal Lack
berechnet	Median	0,87	
berechnet	Mittelwert	0,77	
historisch	Minimalwert	0,54	Betriebsmittel Montage
historisch	Maximalwert	0,97	Personal Montage
historisch	Median	0,87	
historisch	Mittelwert	0,79	

Tab. 5.3: Minimal-, Maximalwert, Mittelwert und Median der Korrelationskoeffizienten aller Dimensionierungsgrößen mit der Stückzahl bei den berechneten sowie historischen Daten

Vergleich der Risikoaggregation mit berechneten und historischen Korrelationskoeffizienten

Für die Verifikation der Risikoaggregation wird ein fiktives Beispiel einer Gesamtfahrzeugproduktion herangezogen, das in Kapitel 4 beschrieben wird und dessen Daten im Anhang in Tabelle A.5 definiert sind. Im Zuge dessen werden ausschließlich die wertschöpfenden Prozesse betrachtet, um die generelle Funktion der Methodik und des Modells zu verifizieren. Die Werte der einzelnen Dimensionierungsgrößen sowie die Quantifizierung der Risiken je Dimensionierungsgröße sind fiktiver Natur und dienen als Beispiel, um die Funktionsweise des Modells zu zeigen und damit die Methodik zu erläutern. Die Korrelationen werden jedoch auf der Basis eines relativen Kostenfaktormodells für eine reale Fabrik von Gesamtfahrzeugen ermittelt und die historischen Daten werden ebenfalls für reale Angebote derselben Fabrik erstellt.

Im Zuge der Gesamtrisikoaggregation können mehrere Werte verglichen werden, die die Auswirkungen der Korrelationsmatrix zeigen. Darunter fallen die Standardabweichung der Gesamtkosten, verschiedene Quantile ξ , beispielsweise die Quantile $\xi_{0,95}$ bei 95-prozentiger und $\xi_{0,99}$ bei 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit. In Tabelle 5.4 werden die Ergebnisse für die Aggregation der Risiken mit Korrelationen auf Basis der Berechnung und der historischen Daten, sowie von unkorrelierten Risiken angeführt. Ausgehend von den zu verifizierenden Ergebnissen der Aggregation mit berechneten Korrelationen wird die Differenz der Ergebnisse absolut und relativ dargestellt.

Aufgrund der bereits festgestellten oftmals hohen Korrelation der Dimensionierungsgrößenpaare beeinflussen die dadurch entstehenden Kovarianzterme das Gesamtrisiko entscheidend. Als Maß für das Risiko wird die Standardabweichung herangezogen. Hierbei ergibt das Gesamtrisiko inklusive Korrelationen einen mehr als doppelt so hohen Wert wie bei Vernachlässigung der Abhängigkeiten und Verwendung von Korrelationen mit

Vergleichswert	Risikoaggregation mit berechneten Korrelationen	Risikoaggregation mit historischen Korrelationen	Risikoaggregation von unkorrelierten Risiken
Standardabweichung σ absolut	35,84 Mio. €	36,86 Mio. €	15,46 Mio. €
Standardabweichung σ relativ	100,00 %	102,86 %	43,14 %
Quantil $\xi_{0,95}$ absolut	767,19 Mio. €	768,88 Mio. €	733,67 Mio. €
Quantil $\xi_{0,95}$ relativ	100,00 %	100,22 %	95,63 %
Quantil $\xi_{0,99}$ absolut	791,61 Mio. €	794,00 Mio. €	744,21 Mio. €
Quantil $\xi_{0,99}$ relativ	100,00 %	100,30 %	94,01 %

Tab. 5.4: Vergleich der Standardabweichung, des Quantils $\xi_{0,95}$ bei 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit und des Quantils $\xi_{0,99}$ bei 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit mit den unterschiedlichen Risikoaggregationen im Anwendungsfall

dem Wert 0. Zwischen dem Ergebnis der Risikoaggregation mit historischen und berechneten Werten liegen weniger als 3 Prozent. Die Berechnung führt somit zu einer geringfügigen Unterschätzung des Gesamtrisikos. Aufgrund der getroffenen Modellvereinfachungen und auch der relativ kleinen Stichprobenanzahl bei den historischen Daten ist ein Unterschied zu dieser Prozentzahl durchwegs zulässig und vorhersehbar. Der Einfluss des relativ hohen Konfidenzintervalls aufgrund der geringen Stichprobenanzahl bei den historischen Daten wird im Zuge einer Sensitivitätsanalyse im nächsten Kapitel untersucht. Bei der Berechnung der Quantile relativiert sich der Unterschied der einzelnen Rechnungen aufgrund des gemeinsamen sehr hohen Nenners, der vom Gesamtangebotswert abhängt. Möchte jedoch das Unternehmen im vorliegenden Anwendungsfall beispielsweise ein Angebot legen, das ein Risiko von 5 Prozent in Kauf nimmt, dass die Kosten über dem Angebotspreis liegen, dann ergibt das Risikomodell mit den berechneten Korrelationen einen Preis mit einem Unterschied von 0,22 Prozent zum Preis auf Basis der historischen Daten. Mit unkorrelierten Risiken ergibt sich eine Abweichung von mehr als 4 Prozent. In diesem Fall würde der Angebotspreis für das in Kauf genommene Risiko deutlich unterschätzt werden. Der gleiche Angebotspreis des Quantils $\xi_{0,95}$ von 733,67 Mio. € ergibt jedoch bei den Modellen mit Berücksichtigung von Korrelationen ein Risiko von rund 24 Prozent.

In Abbildung 5.4 werden die Dichtefunktionen der Risiken nach den drei verschiedenen Risikoaggregationen dargestellt.

5.2.2 Sensitivitätsanalyse und Grenzwertest beim mathematischen Modell

In einer Sensitivitätsanalyse wird ermittelt, in welcher Weise Outputwerte durch Veränderung von Inputwerten des Modells beeinflusst werden (vgl. Rabe et al. (2008, S. 102)).

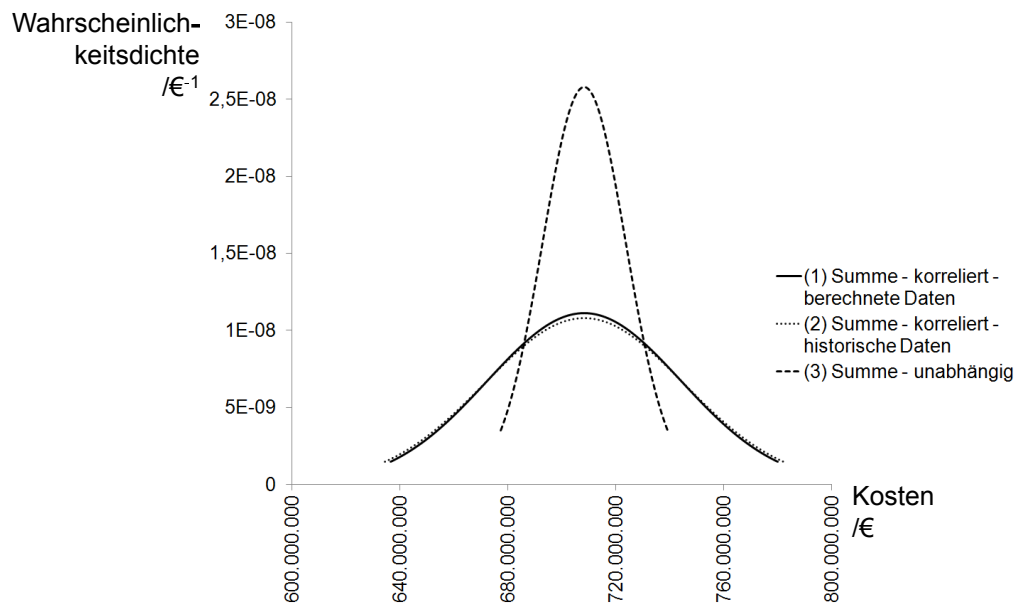


Abb. 5.4: Dichtefunktion f_x der drei Risikoverteilungen: (1) Verteilung inklusive Korrelation der errechneten Werte; (2) Verteilung exklusive Korrelation; (3) Verteilung inklusive Korrelation der historischen Werte

Nehmen dabei die Eingabedaten Extremwerte an, spricht man von einem Grenzwertest (vgl. Rabe et al. (2008, S. 100)). Für die Risikoaggregation sind zwei Möglichkeiten von Sensitivitätsanalysen interessant: Zum einen kann die Risikoaggregation mit Korrelationskoeffizienten in den Grenzen der Konfidenzintervalle berechnet werden und zum anderen können die quantifizierten Risiken bei den Eingabeparametern in praktisch möglichen Grenzen verändert werden.

Sensitivitätsanalyse der Korrelationskoeffizienten auf das Gesamtrisiko

In einer Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen der Grenzen des Konfidenzintervalls sowohl der berechneten als auch der historischen Korrelationskoeffizienten ermittelt. Als Grundlage für die Analyse dient das Anwendungsbeispiel. Im ersten Schritt werden die im Kapitel 5.2.1 ermittelten Grenzen der Konfidenzintervalle von den berechneten Koeffizienten verwendet. Hierbei werden alle Koeffizienten zuerst gemeinsam auf die untere Grenze und dann auf die obere Grenze gesetzt. Aufgrund der sehr hohen Stichprobenanzahl und des engen Konfidenzintervalls der Korrelationskoeffizienten im Bereich von +0,001137 bis +0,01649 sowie -0,001181 und -0,01675 ergeben sich in der Standardabweichung der Gesamtkosten als Maß für das Gesamtrisiko nur prozentuelle Abweichungen im einstelligen Nachkommabereich im Vergleich zu den Werten auf Basis des Kostenfaktormodells. Die Stichprobenanzahl der Berechnung mit 10000 besitzt durch den Konfidenzintervall einen vernachlässigbar geringen Einfluss auf das

Gesamtrisiko und wird somit bestätigt. Bei den Korrelationskoeffizienten der historischen Daten sind teilweise große Konfidenzintervalle aufgrund der geringen Stichprobenanzahl vorhanden, wobei die Grenzen der Intervalle sich je Koeffizient und Stichprobenanzahl zwischen +0,02122 und +0,3466 sowie -0,06995 und -0,5880 bewegen. Dadurch ergeben sich Auswirkungen auf die Berechnung der Standardabweichung der Gesamtkosten von rund -21,81 Prozent bei den unteren und von rund +11,53 Prozent bei den oberen Intervallgrenzen. Diese relativ hohen Abweichungen verdeutlichen die Notwendigkeit der Erhöhung der Stichprobengröße, wenn Korrelationen auf Basis historischer Daten für die Risikoaggregation herangezogen werden sollen. Dies bestätigt die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Korrelationskoeffizienten auf Basis eines Kostenfaktormodells.

Sensitivitätsanalyse der Risiken der Dimensionierungsgrößen auf das Gesamtrisiko

Die Definition der Risiken auf Dimensionierungsgrößenbasis beruht auf Expertenschätzungen in einer Prozentangabe relativ zu den Dimensionierungsgrößen. An dieser Stelle wird geprüft, welche Auswirkungen sich ergeben, sollten sich die Experten um +/-1 Prozentpunkt und +/-5 Prozentpunkte in ihrer Schätzung irren. Diese Abweichungen werden in jenen Fällen untersucht, bei denen sie beim kleinsten Betrag, beim größten Betrag und bei allen Dimensionierungsgrößen auftreten. Als Berechnungsbasis für die Korrelationskoeffizienten dient hierbei die Berechnung mit dem Kostenfaktormodell. In Abbildung 5.5 werden die Änderung und ihre Auswirkungen auf die Standardabweichung der Gesamtkosten in einem Scatterplot gemeinsam dargestellt.

Die Änderung der Risikoquantifizierung um einen Prozentsatz des Wertes der kleinsten Dimensionierungsgröße verursacht eine Änderung der Standardabweichung der Gesamtkosten um rund 0,51 Prozent. Eine Änderung der Risikoquantifizierung um den gleichen Prozentsatz führt beim größten Wert zu einer Differenz von rund 2,2 Prozent. Das Verhältnis vom größten zum kleinsten Wert beträgt rund 5 zu 1. Die Auswirkung auf das gesamte Risiko im ähnlichen Verhältnis ist auf die ähnlichen Korrelationshöhen dieser beiden Werte zurückzuführen. Im vorliegenden Anwendungsfall existieren zumindest gemäßigte, wenn nicht starke Korrelationen aller Dimensionierungsgrößen zueinander. Die Unsicherheiten in der Risikoabschätzung, die im Bereich eines Prozentpunktes bei einer einzigen Dimensionierungsgröße auftreten, besitzen somit zumindest eine ähnliche Auswirkung wie die Unsicherheiten in der Korrelationsermittlung, wie im vorhergehenden Kapitel auf Basis der Konfidenzintervalle eruiert wird. Werden die Risiken bei allen Dimensionierungsgrößen um einen Prozentpunkt entweder zu gering oder zu hoch geschätzt, dann folgen Auswirkungen auf das Gesamtrisiko von rund 8,5 Prozent. Reicht die Risikofehlschätzung bis zu einem Bereich von 5 Prozentpunkten, dann folgt eine Gesamtrisikodifferenz von rund 2,6 bis 42,6 Prozent. Eine Über- beziehungsweise Unterschätzung in

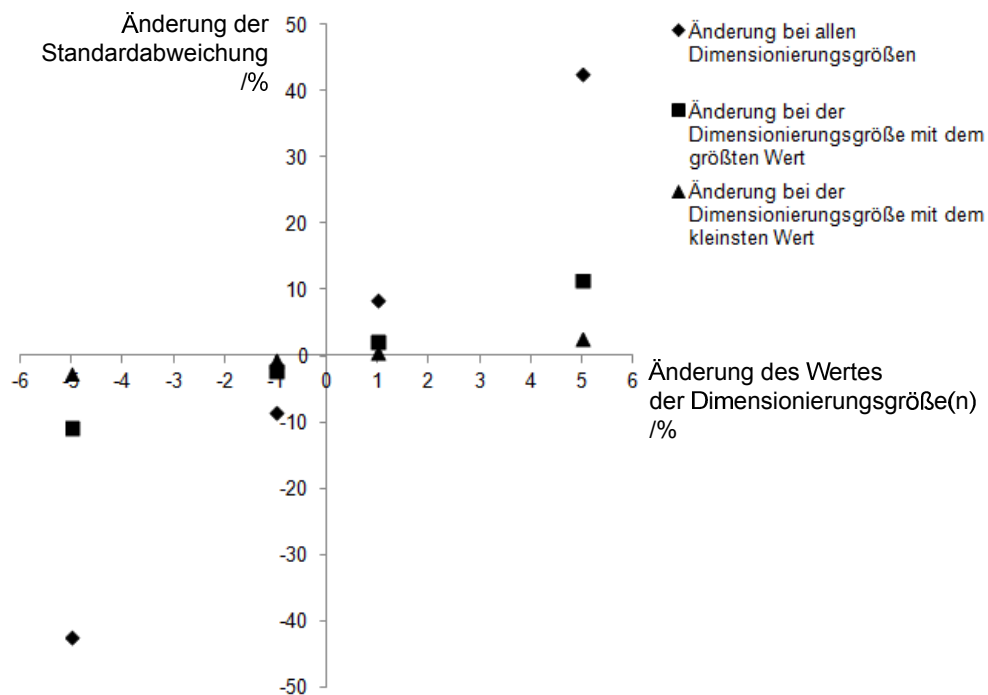


Abb. 5.5: Darstellung der prozentuellen Änderungen der Risikoquantifizierung bei Dimensionierungsgrößen und ihre prozentuellen Auswirkungen auf die Standardabweichung der Gesamtkosten beim Anwendungsfall

diesem Bereich besitzt somit gravierende Auswirkungen auf die Gesamtrisikoaggregation und folglich auf die Risikodefinition beispielsweise während Preisverhandlungen über das Angebot. Dennoch ist davon auszugehen, dass Experten die Risikoabschätzung in einem hohen Detaillierungsgrad vornehmen können, die vielfach als Aufschlag in der Vorkalkulation inkludiert ist.

Aufgrund der vielen positiven Korrelationen bei der Fabrikplanung der Gesamtfahrzeugproduktion veranlasst eine Abweichung bei den Definitionen der Standardabweichungen eine stärkere Auswirkung auf das Gesamtrisiko als bei Anwendungsfällen mit geringen Korrelationen. Die Standardabweichungen beeinflussen die Größe der Kovarianzen, die dann in das Ergebnis der Gesamtvarianz und somit des Gesamtrisikos eingehen.

Grenzwerttest: Der Erwartungswert eines Gewerks ist wesentlich größer als die Werte der anderen Gewerke

Im Grenzwerttest werden mehrere Extremwerte betrachtet und bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Risikoaggregation untersucht. Im ersten Schritt werden extreme Wertunterschiede der Dimensionierungsgrößen untersucht. Hierbei werden die Werte eines Gewerks zu den verbleibenden beiden anderen Gewerken im Verhältnis 1000 zu 1 gesetzt. Auch das spezifische Risiko je Dimensionierungsgröße ändert sich in diesem Verhältnis

mit. Alle drei Gewerke wurden in der Analyse in den Mittelpunkt gesetzt und als Extremwert betrachtet. Als Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass die Gesamtrisikoagregation plausible Werte ergibt. Die Differenzen der Standardabweichung zwischen den Aggregationen mit den berechneten und den historischen Daten bewegen sich zwischen -3 und -5 Prozent, wobei die Ergebnisse der historischen Daten ein etwas geringeres Risiko ergeben. Aufgrund unterschiedlicher Korrelationskoeffizienten, die jeweils besonders bei den höheren Werten zu tragen kommen, befinden sich diese Abweichungen in einem akzeptablen Rahmen.

Grenzwerttest: Der Erwartungswert einer Dimensionierungsgröße ist wesentlich größer als die Werte der anderen Dimensionierungsgrößen

Im Schritt zwei erfolgt eine ähnliche Analyse. In diesem Fall liegt jedoch der Wert einer Dimensionierungsgrößenart, wie beispielsweise des Personals, im Vergleich mit den anderen im Verhältnis 1000 zu 1. Die Berechnung erfolgt wieder für alle drei Dimensionierungsgrößenarten. Ähnlich wie bei den Extremwerten ergibt die Aggregation plausible Werte, wobei sich die Abweichungen der aggregierten Standardabweichung zwischen den berechneten und historischen Korrelationskoeffizienten im Rahmen von 3 bis 6 Prozent bewegen. Die Konstellation der Koeffizienten im Anwendungsfall ergibt für die Extremwerte der Dimensionierungsgrößen positive Abweichungen, die historischen Daten ergeben hier ein größeres Risiko.

Grenzwerttest: Extremfälle der Korrelationskoeffizienten

Nachfolgend werden die Auswirkungen von Extremfällen der Korrelationskoeffizienten getestet. Als erster Test wird für alle Dimensionierungsgrößen eine perfekte Korrelation angenommen, der Korrelationskoeffizient also auf 1 gesetzt. Die Standardabweichung vergrößert sich dadurch um 14 Prozent im Vergleich zu den berechneten Werten. Wenn man berücksichtigt, dass der Durchschnittswert der Korrelationskoeffizienten auf der Basis des Berechnungsmodells 0,73 ergibt, ist eine moderate Steigerung des Gesamtrisikos bei einer vollkommenen Korrelation plausibel.

Abschließend werden vollkommen positive und vollkommen negative Korrelationen in der Matrix kombiniert, sodass eine logische Begründung möglich ist. Nehmen wir als Beispiel die Variablen A, B und C als korrelierend an. Ergibt eine Analyse, dass A mit B vollkommen negativ korreliert und ebenso B mit C, dann muss A mit C vollkommen positiv korrelieren, um ein logisch mögliches Ergebnis zu liefern. Aufgrund der dadurch vielfach vorhandenen negativen Kovarianzen wird das Gesamtrisiko im Vergleich zu den berechneten Korrelationskoeffizienten um rund 92,5 Prozent wesentlich reduziert. Eine deutliche Reduktion ist aufgrund des Unterschiedes zwischen einer durchschnittlich stark positiven

Korrelation und einer Kombination aus vollkommen negativen und vollkommen positiven Korrelationen zu erwarten, weshalb auch hier das Ergebnis als plausibel gedeutet wird.

Mit den Grenzwerttests kann somit gezeigt werden, dass das Rechenmodell zur Risikoaggregation auch bei verschiedenen Extremwerten plausible Ergebnisse liefert, wodurch in dieser Hinsicht keine Einschränkungen für die Anwendung getroffen werden müssen.

Überprüfung der Korrelations- und Kovarianzmatrix

Die Korrelationsmatrix sowie die Kovarianzmatrix können hinsichtlich ihrer Konsistenz überprüft werden. Hierfür werden die Eigenschaften überprüft, ob beide Arten von Matrizen positiv semidefinit beziehungsweise positiv definit sind, wie in Kapitel 2.6.3 erläutert wird. Diese Eigenschaften lassen sich über die Ermittlung der Eigenwerte beweisen. Sind alle Eigenwerte nicht negativ, wird diese Bedingung erfüllt. Im vorliegenden Anwendungsfall wird die Bedingung sowohl für die Korrelations- sowie Kovarianzmatrix der berechneten Werte als auch für die historischen Daten erfüllt. Generell gilt die Korrelationsmatrix für die spezifische Fabrik als überprüft. Nachdem die Kovarianzmatrix von den Standardabweichungen der einzelnen Risikodefinitionen im spezifischen Anwendungsfall abhängig ist, muss diese Bedingung für jeden Fall überprüft werden.

Dies kann im vorliegenden Fall als Beurteilung für die Ermittlung der Korrelationen dienen. Nachdem die Korrelationsmatrix konsistent ist, werden durch sie Abhängigkeiten definiert, die theoretisch konsistent sind.

5.2.3 Verifikation der Normalverteilung

Im Kapitel 3.4.2 wird unter anderem mit dem zentralen Grenzwertsatz begründet, weshalb die Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanung mit Normalverteilungen quantifiziert werden. Eine zentrale Rolle bildet hierbei die Summe vieler voneinander unabhängiger Zufallszahlen. Im Anwendungsfall werden jeweils die drei Dimensionierungsgrößen Personal, Betriebsmittel und Fläche der drei wertschöpfenden Gewerke der Fahrzeugproduktion Rohbau, Lack und Montage betrachtet. Alle drei Dimensionierungsgrößen setzen sich dabei aus verschiedenen Größen zusammen. Auch wenn die Fläche einen quadratischen Wert darstellt, besteht die Flächendimensionierung dennoch aus der Summe von benötigten Flächen, die jeweils in Quadratmeter angegeben werden. Zusätzlich ergibt die Analyse der Einflussfaktoren, dass die einzelnen Dimensionierungsgrößen im vereinfachten Kostenmodell bereits aus der Summe von minimal 21 und maximal 48 Einzelwerten mit einem Mittelwert von 33,5 und einem Median von 35 bestehen. Bei einem komplexeren Modell ist davon auszugehen, dass die Summe aus mehr Einzelwerten besteht. Somit wird auch die zweite Anforderung der Normalverteilungsannahmen, die Notwendigkeit einer hohen Anzahl an Zufallszahlen, erfüllt. Um die Normalverteilungsannahme anhand

eines spezifischen Grenzwertsatzes im Detail zu beweisen, fehlt in dieser vorliegenden Arbeit die Kenntnis über die spezifischen Verteilungen der Einzelwerte sowie deren vollständiger Einfluss auf die aggregierte Verteilung der Dimensionierungsgrößen. In dieser Hinsicht bleibt ein weiterer Forschungsbedarf bestehen, der über die Zielsetzung dieser Betrachtung hinausgeht.

5.3 Validierung der Methodik und des Gesamtmodells

Wie am Anfang dieses Abschnitts erwähnt, beziehen sich Risiken auf die Zukunft. Die Quantifizierung von Unsicherheiten macht diese für den Planungsexperten greifbar, rechenbar und vergleichbar. Nachdem aber der Zukunftsbezug ausschließt, dass schon während der Planung eine Validierung vom Ergebnis des Gesamtrisikos möglich ist und zusätzlich statistische Analysen eine Mindestanzahl an verschiedenen Ergebnissen voraussetzen, kann die Gesamtmethodik in dieser Arbeit nicht gesamtheitlich validiert werden. Dennoch besteht die Möglichkeit, die Fähigkeiten der neu geschaffenen Methodik an einem Anwendungsbeispiel zu demonstrieren und mit den Anforderungen zu vergleichen, die generisch für die Vorkalkulationsmethode in Kapitel 2.4.3 und konkret für die Unsicherheitsquantifizierung im Zuge der Fabrikplanung in Kapitel 3.2 gestellt werden.

5.3.1 Demonstration der Möglichkeiten durch die entwickelte Methodik

Im Zuge der Verifikation in Kapitel 5.2 liegen einige Ergebnisse der entwickelten Methodik vor. Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche Funktionalitäten mit dieser Methodik bestehen.

- Eingabemöglichkeit der Dimensionierungsgrößenwerte
- Eingabemöglichkeit zur Quantifizierung der Unsicherheiten bei den jeweiligen Dimensionierungsgrößen (in Prozent des Dimensionierungsgrößenwertes)
- graphische Darstellung der Dichtefunktion quantifizierter Unsicherheiten
- Eingabemöglichkeit beziehungsweise automatische Anbindung der Korrelationsmatrix der Dimensionierungsgrößen
- Aggregation der Dimensionierungsgrößen zu Gesamtkosten
- Aggregation der quantifizierten Unsicherheiten zum Gesamtrisiko
- Analyse der Einzelwerte Standardabweichung, Quantile und VaR als Maß für das Gesamtrisiko
- graphische Darstellung der Dichtefunktion des Gesamtrisikos

- Aggregation der Dimensionierungsgrößen zu Detailkosten
- Aggregation der quantifizierten Unsicherheiten zu Detailrisiken
- Analyse der Einzelwerte Standardabweichung und Quantile als Maß für Detailrisiken
- graphische Darstellung der Dichtefunktion der Detailrisiken

In einem eigenen Berechnungsmodell werden die Korrelationskoeffizienten der Korrelationsmatrix ermittelt. Dieses bietet folgende Funktionalitäten:

- Eingabemöglichkeit der relativen Abhängigkeiten der Einflussfaktoren auf die Detaildimensionierungsgrößen
- Bildung eines relativen Kostenfaktormodells
- Generierung von Stichprobenwerten für die Dimensionierungsgrößen auf Basis des relativen Kostenfaktormodells
- Kalkulation der Korrelationskoeffizienten zwischen den Dimensionierungsgrößen auf Basis der Stichprobenwerte des relativen Kostenfaktormodells

Alle aufgelisteten Funktionalitäten basieren auf Microsoft® Office Excel®. Die Modelle besitzen verschiedene Eingabemöglichkeiten, interne Berechnungen und Outputs inklusive graphischer Darstellung. Im Zuge der Verifizierung kann die Analyse der Standardabweichung, der Quantile und der graphischen Darstellung Dichtefunktion für das Gesamtrisiko gezeigt werden. Analoge Funktionalitäten werden für Detailrisiken geboten, wobei die Anzahl der berücksichtigten Dimensionierungsgrößen im Vergleich zum Gesamtrisiko reduziert wird. Beispielfhaft können die aggregierten Risiken der Gewerke untereinander oder der Dimensionierungsgrößenarten untereinander verglichen werden. Nachdem ein Angebotspreis häufig nur für die Gesamtproduktion vorhanden ist, ist die Bildung der Quantile auf Detailebene nicht möglich, da dieser einen Detailpreis voraussetzt. Aus diesem Grund ist eine Auswertung der Quantile bei Detailrisikobetrachtungen nicht vorgesehen, kann jedoch bei Bedarf einfach ergänzt werden.

In Darstellung 5.6 sind die Graphiken für das Gesamtrisiko und Detailrisiken sowie die Überblicksinformationen bezüglich des Gesamtrisikos für den Anwendungsfall in einem einzigen Bild als Überblickscockpit dargestellt.

In Tabelle 5.5 werden die Einzelwerte der Risikoaggregation wiedergegeben.

Nachdem die Berechnung der einzelnen Quantile auf den aggregierten Varianzen und Kovarianzen basiert, bildet die Summe der Detailwerte, beispielsweise der drei Quantile $\xi_{0,95}$ der Gewerke, nicht den Wert $\xi_{0,95}$ des Gesamtrisikos. Diese Detailquantile eignen sich somit nicht für Summenbildungen, sondern nur für die Interpretation des Detailrisikos.

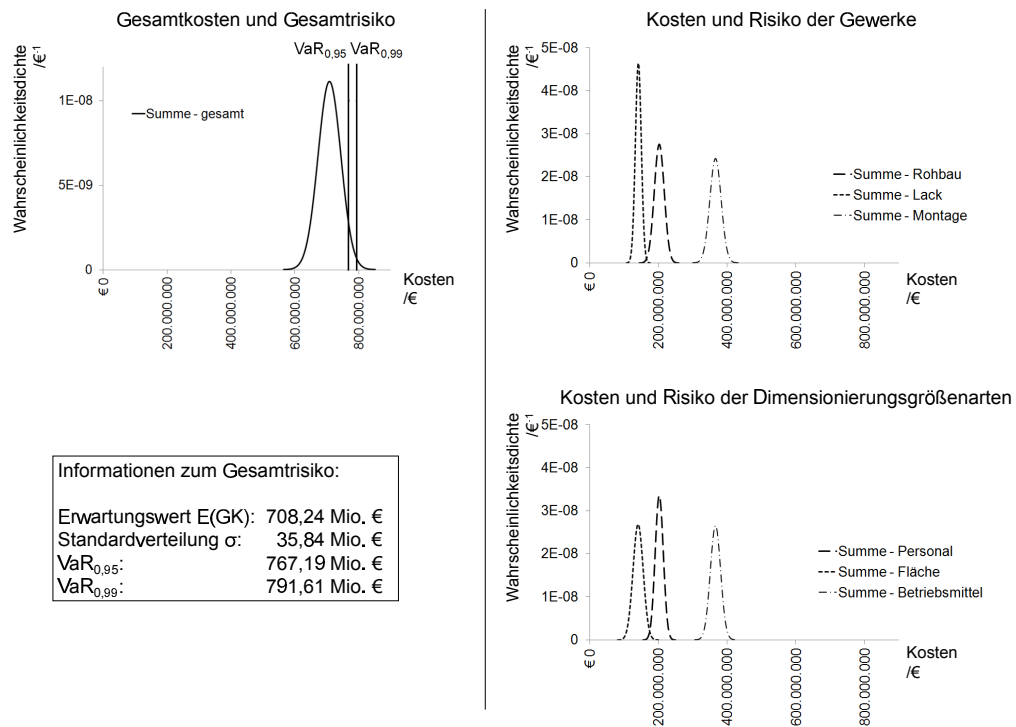


Abb. 5.6: Zusammenfassung der graphischen Darstellung der Dichtefunktion des Gesamtrisikos und ausgewählter Detailrisiken (im Intervall $\mu - 4\sigma$ bis $\mu + 4\sigma$) sowie zusätzlicher Überblicksinformationen am Beispiel des Anwendungsfalls

5.3.2 Zusammenfassung der Anforderungserfüllung auf Basis der Demonstration der Möglichkeiten

In diesem Kapitel werden die allgemeinen Anforderungen an die Vorkalkulation aus Abbildung 2.14 und die spezifischen Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik aus Tabelle 3.1 in Tabelle 5.6 und 5.7 der entwickelten Methodik mit dem dahinterliegenden Modell gegenübergestellt und mit einem dreiteiligen Bewertungsschema (vollständig vorhanden (vorh.), teilweise vorhanden (tw. vorh.), nicht vorhanden (nicht vorh.) und nicht beurteilt (nicht beurt.)) auf Basis der Methodikbeschreibung, der Demonstration am Anwendungsfall, einer Prozesserhebung der frühen Fabrikplanung beim Auftragsfertiger sowie von Experteninterviews beim Auftragsfertiger bewertet und begründet. Auffällige Details und Abweichungen von den Anforderungen werden im Folgenden näher beschrieben.

Im Zuge der Demonstration in Kapitel 5.3.1 wird die allgemeine Anwendung der Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der Fabrikplanung am Beispiel der Gesamtfahrzeugproduktion gezeigt. Vielfältige Anforderungen an das Modell können damit erfüllt werden. Grundsätzlich kann damit bestätigt werden, dass Unsicherheiten ohne großen Zusatzaufwand quantifiziert und unter Berücksichtigung von linearen Abhängigkeiten zu einem Gesamtrisiko aggregiert werden können. Zusätzlich stehen verschiedene

Risikobereich	Standardabweichung σ	Quantil $\xi_{0,95}$	Quantil $\xi_{0,99}$
Gesamtrisiko	35,84 Mio. €	767,19 Mio. €	791,61 Mio. €
Risiko Rohbau	14,48 Mio. €	225,25 Mio. €	235,12 Mio. €
Risiko Lack	8,60 Mio. €	154,95 Mio. €	160,81 Mio. €
Risiko Montage	16,48 Mio. €	393,10 Mio. €	404,33 Mio. €
Risiko Personal	11,87 Mio. €	220,97 Mio. €	229,06 Mio. €
Risiko Flächen	14,86 Mio. €	165,24 Mio. €	175,36 Mio. €
Risiko Betriebsmittel	15,00 Mio. €	390,67 Mio. €	400,89 Mio. €

Tab. 5.5: Vergleich des Gesamtrisikos und der Detailrisiken im Anwendungsfall anhand der Standardabweichung, des Quantils $\xi_{0,95}$ bei 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit und des Quantils $\xi_{0,99}$ bei 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit

graphische Analysemöglichkeiten und Kennzahlen zur Risikobeurteilung zur Verfügung. Diese Möglichkeiten können ohne großen Mehraufwand in den Prozess der frühen Fabrikplanungsphase, der im Zuge dieser Arbeit für den Auftragsfertiger erhoben wurde, integriert werden. Einerseits wird die Software Microsoft® Office Excel®, die als Basis für die Zusammenführung der Einzelkalkulationen der Dimensionierungsgrößen dient, verwendet, und andererseits werden am Prozess keine Änderungen vorgenommen, außer dass jeder Planungsexperte die von ihm errechneten Dimensionierungsgrößen mit einem prozentuellen Wert ergänzt, der die jeweiligen Unsicherheiten quantifiziert.

Die Anforderung des geringen Zusatzaufwandes steht im Widerspruch zu einer Quantifizierungsmöglichkeit auf Detaillevel. Werden auf einem Detaillevel Unsicherheiten quantifiziert, dann steigt der Aufwand für den Planungsexperten, da er für jede Detailgröße eine Risikoabschätzung abgeben muss. In dieser Methodik steht der geringe Zusatzaufwand im Vordergrund, weshalb die Unsicherheiten nicht auf unterstem Detaillevel beurteilt werden. Dadurch entsteht auch ein geringerer Zusatzaufwand zur Ermittlung der Korrelationen, da in diesem Fall nur die Korrelationen auf der Ebene der Quantifizierung notwendig sind. Für die Erhebung von Korrelationen in einer hohen Detaillierung sind ebenso detaillierte Berechnungsmodelle notwendig, die die Detaildimensionierungsgrößen als Output besitzen. Zur Verifikation dieses Berechnungsmodells bedarf es zusätzlich historischer Daten dieser Detaildimensionierungsgrößen in einer für statistische Analysen relevanten Stichprobenanzahl.

Unter dem Einfluss eines geringen Aufwandes steht auch die nur teilweise erfüllte Anforderung der nachvollziehbaren Ermittlung der Risiken. Zwar können Risiken auf die einzelne Dimensionierungsgröße zurückgeführt und deren Auswirkungen analysiert werden, jedoch liegt die Bewertung des Risikos in der Hand des Planungsexperten, der den Bereich für die drei Dimensionierungsgrößen eines Gewerks abschätzt, in dem mit 95,5-prozentiger Wahrscheinlichkeit die Kosten liegen werden. Dem Experten muss also möglich sein, das Risiko auf dieser Detaillierungsebene zu beurteilen. Eine Quantifi-

Anforderung	Bewer- tung	Begründung
geringer Zusatzaufwand für Planer	vorh.	Zusatzaufwand nur in Form der Unsicherheitsquantifizierung je Dimensionierungsgröße in Prozent, einmaliger Aufwand zur Erstellung des relativen Kostenfaktormodells und konstante Überprüfung auf dessen Aktualität
transparente Darstellung des Gesamtrisikos	vorh.	Gesamtrisiko als Normalverteilung dargestellt
transparente Darstellung der Detailrisiken	vorh.	Detailrisiko als Normalverteilung dargestellt
Analysemöglichkeit bzgl. Ursachen- und Wirkungszusammenhänge der Risiken	vorh.	Ursache- und Wirkungszusammenhänge anhand Kovarianz- und Korrelationsmatrix ermittelbar; Zusammenhänge ebenfalls im relativen Kostenfaktormodell vorhanden
Analysemöglichkeit hinsichtlich des quantifizierten Gesamtrisikos	vorh.	Gesamtrisiko mit Dichtefunktion, Quantile, Standardabweichung und VaR analysierbar
nachvollziehbare Ermittlung der Risiken	tw. vorh.	Risikoaggregation nachvollziehbar, jedoch Quantifizierung der Unsicherheiten nicht nachvollziehbar, da Expertenschätzung
quantifiziertes Gesamtrisiko	vorh.	Gesamtrisiko als Normalverteilung dargestellt
quantifiziertes Detailrisiko	vorh.	Gesamtrisiko als Normalverteilung dargestellt
Abbildung der Ursachen- und Wirkungszusammenhänge der Risiken	vorh.	Ursachen- und Wirkungszusammenhänge mittels Kovarianz- und Korrelationsmatrix abgebildet
Abbildung der Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen	vorh.	Zusammenhänge im relativen Kostenfaktormodell und Korrelationskoeffizienten vorhanden
Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu Gesamtkosten	vorh.	Aggregationsmöglichkeit der Kosten beliebig vorhanden
Aggregationsmöglichkeit der Detailkosten zu spezifischen Kostenzusammenfassungen	vorh.	Aggregationsmöglichkeit der Kosten beliebig vorhanden

Tab. 5.6: Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik

Anforderung	Bewer-	Begründung
	tung	
Hoher Detaillierungsgrad der Kalkulation	vorh.	Kalkulation beliebig detailliert möglich
Geringer Zeitbedarf	vorh.	Zusatzaufwand nur in Form der Unsicherheitsquantifizierung je Dimensionierungsgröße in Prozent, einmaliger Aufwand zur Erstellung des relativen Kostenfaktormodells und konstante Überprüfung auf dessen Aktualität
Flexibilität bezüglich atypischer Projekte	vorh.	Zusammenhänge atypischer Projekte im relativen Kostenfaktormodell analysierbar und somit als Korrelationsmatrix übertragbar
Nachvollziehbarkeit der Änderungen im Zuge der Kalkulation	nicht beurteilt.	Änderungen der Kalkulation in Excel über externes Datenmanagement nachvollziehbar, nicht Teil dieser Arbeit
Nachvollziehbarkeit der Auswirkungen von Änderungen	nicht beurteilt.	Änderungen der Kalkulation in Excel über externes Datenmanagement nachvollziehbar, nicht Teil dieser Arbeit
Kalkulation in Dimensionierungsgrößen Personal, Betriebsmittel, Flächen	vorh.	Kalkulation mit diesen Dimensionierungsgrößen im Detail möglich
Unterscheidung von fixen und variablen Kosten sowie von Einzel- und Gemeinkosten	vorh.	Kalkulation mit diesen Unterscheidungen im Detail möglich
Quantifizierungsmöglichkeit der Unsicherheiten auf für die Risikoanalyse notwendigem Detaillevel	vorh.	Unsicherheitsquantifizierung auf Ebene der Dimensionierungsgrößen, aber nicht auf einer detaillierten Kalkulationsebene
Aggregationsmöglichkeit der Risiken zu Gesamtrisiko	vorh.	Aggregationsmöglichkeit der Kosten beliebig vorhanden
Nachvollziehbarkeit der Risikoaggregation	vorh.	Risikoaggregation nachvollziehbar, jedoch Quantifizierung der Unsicherheiten nicht nachvollziehbar, da Expertenschätzung
Analysemöglichkeit der Hauptrisiken	vorh.	Gesamtrisiko mit Dichtefunktion, Quantile, Standardabweichung und VaR analysierbar

Tab. 5.7: Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an die Methoden zur Vorkalkulation

zierung auf einer detaillierteren Ebene stellt einen wesentlichen Mehraufwand dar, das mathematische Modell kann jedoch an diese Veränderung angepasst werden. Im Zuge der Erstellung wird jedoch diese Vereinfachung in Kauf genommen, um eine einfache Anwendbarkeit in den Vordergrund zu stellen. Im Zuge von Expertenbefragungen während der Validierung wurde auch die Meinung vertreten, dass neben symmetrischen Verteilungen auch asymmetrische ausgewählt werden können. Asymmetrische Verteilungen müssen jedoch mit mehr als nur zwei Parametern spezifiziert werden und für die spezifische Anwendung auf Basis von historischen Daten überprüft werden. Hierfür sind Untersuchungen notwendig, mit welcher Verteilung diesen Daten am besten angenähert werden kann.

Die allgemeinen Anforderungen an die Vorkalkulation, Änderungen in der Kalkulation nachvollziehen zu können, werden in dieser Arbeit vorbereitet, bleiben jedoch unberücksichtigt, da dies bei einer Anwendung von Microsoft® Office Excel® über ein dahinterliegendes Datenmanagement geregelt werden kann. Grundsätzlich bestehen jedoch Möglichkeiten, auch diese Anforderungen zu erfüllen, sie stehen jedoch nicht im Mittelpunkt der vorliegenden Betrachtung.

5.3.3 Auswirkungen durch Einführung der Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten

Werden die Hauptprozessschritte eines generischen Angebotsprozesses in Abbildung 2.11 betrachtet, folgt der Angebotserstellung die Angebotsfinalisierung, während derer die Angebotswerte zentral erfasst und anschließend von den verantwortlichen Stellen freigegeben werden. Durch Einführung einer stochastischen Methodik zur frühen Fabrikplanung besitzt diese neue Methodik Auswirkungen auf die freigebenden Stellen, die außerhalb der in dieser Arbeit gesetzten Systemgrenzen liegen. Im Gegensatz zu deterministischen Ansätzen kann für jeden Angebotspreis ein potentiell Risiko ermittelt werden, demzufolge dieser Preis von den Kosten überstiegen wird. Das Risiko wird hierbei in Prozent der eintretenden Wahrscheinlichkeit angegeben.

Generell stehen den freigebenden Stellen die vier Möglichkeiten der Maßnahmen des Risikomanagements offen, um auf das vorhandene Risiko zu reagieren. Zum einen kann dieses beim verhandelten Preis in Kauf genommen werden, das anhand der Dichtefunktion der Gesamtkosten ermittelt wird. Zum anderen kann versucht werden, die quantifizierten Unsicherheiten durch erhöhte Planungstätigkeiten zu reduzieren. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Risiko generell zu vermeiden, indem beispielsweise auf das Legen eines hochriskanten Angebots verzichtet wird. Ebenfalls ist es möglich, das Risiko zu transferieren, indem riskante Teilprozesse der Fertigung an einen Zulieferer vergeben werden oder auch Versicherungen abgeschlossen werden. Die hier angeführten Möglichkeiten stellen Beispiele infrage kommender Maßnahmen des Risikomanagements dar,

besitzen jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Anhand der Normalverteilung sind im mathematischen Modell die 2 Stellhebel Erwartungswert und Standardabweichung vorhanden, um auf das Risiko einzugreifen. Das bedeutet, dass durch eine detaillierte Planung der Fabrik entweder die Dimensionierungsgrößen an sich oder deren Unsicherheiten reduziert werden können. Diese Erhöhung der Planungstätigkeiten steht im Spannungsfeld des Steuerungsdreiecks des Projektmanagements mit den 3 Stellgrößen Zeit, Kosten und Qualität (vgl. Kuster et al. (2011, S. 72 f.)). Durch vermehrte Planungsaktivitäten wird zwar eine erhöhte Qualität der Planung ermöglicht, wobei dies jedoch sowohl Einfluss auf die Dauer als auch auf die Kosten der Angebotslegung besitzt. An dieser Stelle ist unternehmensintern zu analysieren, ob erhöhte Kosten in der Angebotslegung durch die damit gewonnenen, erfolgreichen Projekte getragen werden. Bei der Reduzierung von Unsicherheiten ist zusätzlich zu betrachten, dass durch eine detaillierte, unternehmensinterne Fabrikplanung die internen Unsicherheiten reduziert werden können. Jedoch hat dies keine Auswirkungen auf die externen Unsicherheiten, die in den Produkt- und Produktionsinformationen enthalten sind. Hier kann ein Ansatz darin bestehen, durch erhöhte Kommunikation mit dem Kunden den Gehalt dieser Informationen zu erhöhen. Die mögliche Reduzierung der Erwartungswerte und Unsicherheiten kann mittels eines neuen Durchlaufs der beschriebenen Methodik erfasst werden, wobei die Korrelationsanalyse der Fabrik weiterhin Gültigkeit besitzt, wenn keine Änderungen der grundlegenden verwendeten Zusammenhänge und Produktionstechnologien stattfinden.

Abschließend muss beachtet werden, dass trotz der Erfüllung zahlreicher Anforderungen durch die Methodik, wie in Kapitel 5.3.2 beschrieben wird, der Implementierung und Einführung dieser Methodik eine besondere Bedeutung zukommt. Da nicht nur die Fabrikplaner von der neuen Methodik betroffen sind, sondern auch die Verantwortlichen für die Freigabe des Angebots zur Auftragsfertigung, besteht die Notwendigkeit des gegenseitigen Vertrauens über die neu gewonnene Transparenz der Risiken im Angebot. In den im Zuge der Methodikentwicklung durchgeführten Experteninterviews wurde dieser Faktor besonders betont, da das Risiko in der Fabrikplanung mit dieser Methodik zwar transparent dargestellt wird, es aber an den einzelnen, unterschiedlichen Akteuren liegt, mit dem definierten Risiko umzugehen und geeignete Maßnahmen zu treffen.

5.3.4 Beantwortung der Forschungsfragen

Als Abschluss der Verifikation und Validierung werden die in der Einleitung gestellten Forschungsfragen noch einmal in Erinnerung gerufen und hinsichtlich der Beantwortung überprüft. In der ersten Frage werden die Arten der Unsicherheiten gesucht, die im Zuge der frühen Fabrikplanung auftreten. In dieser Arbeit werden die Unsicherheiten nach der Art der auftretenden Informationen im Zuge der Fabrikplanung sowie nach deren

Ursachen unterteilt. Unsicherheiten treten bei Produkt-, Produktions-, Prozess- und Ressourceninformationen auf und haben ihre Ursachen in der Einzigartigkeit von Vorhaben, in der Variabilität von unterschiedlichen Produkten und Projekten hinsichtlich Zeit, Kosten und Qualität und in der Unklarheit der auftretenden Informationen. Durch diese Unterteilungen sind somit die Art und Ursachen der Unsicherheiten definiert.

Die zweite Forschungsfrage widmet sich der Möglichkeit, wie Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase quantifiziert werden können. Im Zuge der Literaturrecherche in Kapitel 2 sind einige Vorkalkulationsmethoden, die Unsicherheiten berücksichtigen, erwähnt und beschrieben, wobei eine stochastische Methode nach Bewertung in dieser Arbeit das größte Potential besitzt, um den Anforderungen der frühen Fabrikplanung zu genügen. Hierbei werden Unsicherheiten mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben und als Risiken quantifiziert.

Auf Basis der letzten Forschungsfrage wird eine Methodik gesucht, mittels der quantifizierte Unsicherheiten für eine Risikobewertung der Fabrikplanung von herausfordernden Produkten mit komplexen Produktionsanforderungen verwendet werden können. Hierfür wurde eine Methodik entwickelt und anhand von historischen Daten sowie eines Anwendungsfalls verifiziert und validiert. Die Unsicherheiten werden auf der Ebene der Dimensionierungsgrößen der einzelnen Gewerke quantifiziert und mit einer eigens ermittelten Korrelationsmatrix, die die Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen zueinander spezifiziert, zu einem Gesamtrisiko aggregiert. Anhand des beschriebenen Vorgehens im Zuge der Methodik kann diese für verschiedene Anwendungsfälle von Fabrikplanungen und in unterschiedlichen Unternehmen eingeführt werden.

5.4 Zwischenfazit

An die Methodik und das mathematische Modell zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase werden umfangreiche Anforderungen gestellt, die in den Kapiteln 2.4.3 und 3.2 ermittelt werden. Eine Methodik auf Basis der Stochastik wird im Zuge der Verifikation und Validierung mit historischen Daten und einem fiktiven Anwendungsfall, der für eine reale Produktion von Gesamtfahrzeugen gebildet wird, verglichen und getestet. Neben statistischen Tests hinsichtlich Signifikanz und Konfidenzintervalle werden auch Grenzwerttests und Sensitivitätstests durchgeführt sowie Konsistenzbedingungen überprüft. Abschließend wird die Gesamtmethodik den getroffenen Anforderungen gegenübergestellt und die Beantwortung der Forschungsfragen geprüft.

Generell ergibt der Vergleich für das Ergebnis der Korrelationsmatrix geringe Abweichungen zwischen den Werten auf Basis des relativen Kostenfaktormodells und der historischen Daten. Bei den dimensionslosen Korrelationskoeffizienten, die per Definition innerhalb des Intervalls von -1 bis +1 liegen, ergeben sich Abweichungen im Bereich von

minimal -0,25 bis maximal +0,28, wobei diese ein tendenziell normalverteiltes Abweichungsverhalten um 0 aufweisen. Diese Abweichungen wirken sich in rund 2,86 Prozent Differenz zwischen dem Gesamtrisiko der berechneten Werte und der historischen Daten aus. Das mathematische Modell zur Ermittlung der Korrelationen anhand eines vereinfachten, relativen Kostenfaktormodells kann somit verifiziert werden. Auch die Kalkulation mit den Grenzwerten des Konfidenzintervalls mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit der berechneten Werte besitzt keine relevanten Auswirkungen auf die Aggregation des Gesamtrisikos.

Eine entscheidende Bestätigung für ein Vorhandensein von Korrelationen wird mit dem statistischen Test der Hypothese, dass keine Korrelation vorhanden ist, bei einem 95-prozentigem Signifikanzniveau ermittelt. Das Ergebnis besagt, dass die erwähnte Hypothese für alle Dimensionierungsgrößen bis auf eine mit 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann. Der Vergleich des Gesamtrisikos, das anhand von Korrelationen mit dem Wert 0 kalkuliert wird, mit dem Gesamtrisiko, das mit den Korrelationskoeffizienten auf Basis der Berechnung ermittelt wird, ergibt eine deutliche Differenz. Wenn nur Korrelationen mit dem Wert 0 berücksichtigt werden, dann wird die Standardabweichung als Maß des Gesamtrisikos um rund 57 Prozent reduziert. Dies führt in weiterer Folge zu einer Unterschätzung des Risikos bei spezifischen Verhandlungspreisen. Dieser deutliche Unterschied basiert auch auf der Tatsache vom Vorhandensein zumeist gemäßigter, wenn nicht starker Korrelationen der Dimensionierungsgrößen zueinander und unterstreicht die Forderungen zur Berücksichtigung der Korrelationen, wie mehrere Autoren in ihren Veröffentlichungen in Kapitel 2.7.2 zeigen (vgl. unter anderen Khodakarami & Abdi (2014), Yang (2011), Chou et al. (2009), Cooper et al. (2005), Gleißner (2001), Wall (1997), Touran (1993) und Iman & Conover (1982)).

Viele der Anforderungen, die an eine Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten gestellt werden, sind mit der vorgestellten erfüllt. Es ermöglicht dem Anwender, Risiken in verschiedenen Ebenen und gesamt zu aggregieren, dabei auch die Kosten mitzuberechnen und verschiedene graphische Analysen und Kennwerte zu ermitteln. Ein Zielkonflikt herrscht bei der Anforderung nach einem geringen Zusatzaufwand und nach einer möglichst detaillierten Unsicherheitsquantifizierung vor. Die Ebene wird zusätzlich sowohl von der vorhandenen Datentiefe als auch vom Detaillierungsgrad des Berechnungsmodells beeinflusst. Im Vordergrund der vorgestellten Lösungsvariante steht der geringe Zusatzaufwand für den Planungsexperten. Aus diesem Grund wird die Ebene der Quantifizierung auf der Aggregationsstufe der Dimensionierungsgrößen für jeden Produktionsprozess gewählt. Das bedeutet, der Planungsexperte quantifiziert die Unsicherheiten für die Betriebsmittel, Flächen und Personal für jeden Produktionsprozess. Dies ergibt eine Vereinfachung, da diese einzelnen Werte jene der Detaildimensionierungsgrößen beinhalten. Sie bieten dem Planer jedoch die Möglichkeit, das Risiko in drei Kernbereiche zu unterscheiden und somit nachvollziehbar zu machen.

Gerade bei stark vernetzten Produktionsprozessen und Produktionsgewerken sind somit Korrelationen für eine Risikobetrachtung während der Planung von großer Bedeutung, wie das Beispiel der Gesamtfahrzeugproduktion zeigt. Abhängigkeiten können die Standardabweichung als Maß für das Gesamtrisiko im Vergleich zu unabhängigen Risiken deutlich erweitern, jedoch bei negativer Korrelation auch deutlich reduzieren. Besonders bei komplexen Produkten mit einer stark vernetzten Produktion kommt die Bedeutung der linearen Abhängigkeiten der Dimensionierungsgrößen zu tragen, die in Form von Korrelationskoeffizienten bei einer Risikobetrachtung zu berücksichtigen sind.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

6.1.1 Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase

Unsicherheiten stehen in direktem Bezug zu zukunftsorientierten Planungen. Von Natur aus sind Ereignisse in der Zukunft unsicher. Ist es möglich, die Unsicherheiten für eine spezifische Planung zu quantifizieren, werden sie in sogenannte Risiken transferiert. Risiken haben den Vorteil, dass sie Informationen besitzen, die das Auftreten der Ereignisse spezifizieren. Eine Möglichkeit hierfür besteht im Einsatz der mathematischen Statistik und im Aufbau eines stochastischen Modells zur Risikobeschreibung.

Gerade im Zuge der frühen Phase der Fabrikplanung können vermehrt Unsicherheiten auftreten. Sie werden in Produkt-, Produktions-, Prozess-, und Ressourceninformationen eingeteilt. Als Ursachen dafür können ganz allgemein die Einzigartigkeit des Vorhabens, eine Variabilität bei den zu planenden Produkten sowie Unklarheiten bei den definierten Informationen in Betracht kommen (vgl. Khodakarami & Abdi (2014, S. 1)). Speziell eine Phasenüberschneidung zwischen der Produktentwicklung und der Fabrikplanung bietet eine besondere Herausforderung, die Unklarheiten bezüglich der Produkt- und Produktionsinformationen auslöst. Das Produkt sowie die Produktionsanforderungen sind dann noch nicht vollständig definiert, wenn bereits von einem Auftragsfertiger ein Angebot für die Produktion eingeholt wird. Dieses Angebot stützt sich auf die Dimensionierung der einzelnen Gewerke im Zuge der frühen Fabrikplanung. Der Input in diese Fabrikplanungsphase stellt dabei die unsicheren Informationen bezüglich des Produkts und der Produktion dar, der Output wird mit dem Personal, den Flächen und den Betriebsmitteln als aggregierter Output je Gewerk spezifiziert. Neben der Dimensionierungstätigkeit an sich, die aufgrund zeitlicher und monetärer Grenzen in dieser Phase einer Beschränkung unterliegt, sind ebenfalls viele Inputgrößen mit Unsicherheiten behaftet.

6.1.2 Quantifizierung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase

In dieser Arbeit wird ein mathematisches Modell entwickelt, das die Quantifizierung von Unsicherheiten ermöglicht und in weiterer Folge in eine übergreifende Methodik eingebet-

tet wird, wobei als Anwendungsfall ein europäischer Auftragsfertiger von Gesamtfahrzeugen dient. Hierbei werden die Unsicherheiten auf der Ebene der Dimensionierungsgrößen je Gewerk vom jeweiligen Planungsexperten mithilfe von Normalverteilungen beschrieben. Der Grund für die Normalverteilung liegt erstens in der einfachen Möglichkeit zur Quantifizierung mit den lediglich zwei Parametern Erwartungswert und Standardabweichung, wodurch die Verteilungsbeschreibung bei Fehlen von Detailinformationen zur statistischen Kalibrierung wesentlich erleichtert wird (vgl. Lurie et al. (1993, S. 2)). Zweitens greift bei der Aggregation einer großen Anzahl voneinander unabhängiger Verteilungen der zentrale Grenzwertsatz, der in einem solchen Fall besagt, dass das Ergebnis sich einer Normalverteilung annähert (vgl. Deutsch (2008, S. 640)). Drittens kann im Falle von Risikoaggregationen festgestellt werden, dass die Berücksichtigung von Korrelationen einen wesentlich höheren Einfluss auf das Gesamtrisiko besitzt als die Form der Wahrscheinlichkeitsverteilung, welche die Unsicherheiten im speziellen Fall am besten beschreibt (vgl. Wall (1997)). Bei der Vernachlässigung der Korrelationen im Zuge der Aggregation besteht die Gefahr einer wesentlichen Unterschätzung des Gesamtrisikos.

6.1.3 Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase

Die erweiterte Methodik zur Berücksichtigung von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanungsphase besteht aus drei Grundelementen. Im ersten Element werden die Korrelationen der Dimensionierungsgrößen zueinander anhand eines Kostenmodells ermittelt. Hierfür werden Stichproben der Dimensionierungsgrößen für eine große Anzahl von fiktiven Produkten mithilfe einer Monte-Carlo-Simulation erzeugt, indem Zufallszahlen für die Inputwerte in definierten Grenzen, die durch die betrachtete Fabrik festgelegt werden, generiert werden. Die linearen Abhängigkeiten werden daraufhin anhand von Pearsonschen Korrelationskoeffizienten ermittelt, die bei der Aggregation von Normalverteilungen Anwendung finden. Generell können verschiedene Kostenmodelle für die Fabrik mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad ermittelt werden. Für den Fall des Fehlens eines solchen Modells wird in dieser Arbeit ein relatives Kostenfaktormodell vorgestellt, das Expertenschätzungen für die Abhängigkeiten der Detaildimensionierungsgrößen von den Inputfaktoren als Basis der Berechnung in den Mittelpunkt stellt. Im Zuge der Verifikation und Validierung kann dieses speziell für die Ermittlung von Korrelationskoeffizienten entwickelte Modell anhand von Werten realer Projekte verifiziert werden. Dadurch steht eine effiziente Methode zur Verfügung, wenn nicht genügend Daten aus vergangenen Projekten für die Korrelationsberechnung herangezogen werden können, die Erstellung eines detaillierten Kostenmodells sich als zu aufwändig herausstellt und aufgrund der Komplexität des Produktes Schwierigkeiten bestehen, Korrelationen direkt zu schätzen. Der Output dieses Elements besteht aus einer Korrelationsmatrix für eine spezifische Fabrik.

Das zweite Element bietet dem Planungsexperten die Möglichkeit, den Erwartungswert und die Standardabweichung für die betroffenen Dimensionierungsgrößen zur Quantifizierung des Unsicherheitsbereiches an das mathematische Modell zu übergeben. Zusätzlich werden die Kostenbewertungen der Dimensionierungsgrößen durch die kaufmännische Kalkulation in dieses Modell integriert, um alle Größen auf eine gemeinsame Einheit, beispielsweise einer definierten Währung, zu bringen.

Das mathematische Modell im dritten Element verbindet die beiden vorigen Elemente, um den Gesamterwartungswert mit dem Gesamtrisiko zu aggregieren. Hierbei werden die einzelnen Erwartungswerte summiert und die Risiken der einzelnen Dimensionierungsgrößen anhand einer Kovarianzmatrix, die auf der Korrelationsmatrix basiert, aggregiert. Im abschließenden Postprocessing besteht die Möglichkeit, verschiedene Analysen bezüglich der Gesamt- und Detailwerte sowohl der Kosten als auch der Risiken durchzuführen. Darunter fallen die Berechnung und graphische Darstellungen verschiedener Quantile, des Value-at-Risk sowie Wahrscheinlichkeitsaussagen für definierte Preise.

Im Zuge der durchgeführten Verifikation und Validierung kann der besondere Einfluss der Korrelationen anhand des Anwendungsfalls für eine reale Fabrik eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen nachgewiesen werden. Die Dimensionierungsgrößen besitzen sowohl bei den historischen Daten als auch bei den berechneten Werten mithilfe des relativen Kostenfaktormodells zumindest gemäßigte, positive und großteils sogar starke, positive Korrelationen. Dadurch wird an einem Beispielprojekt eine Differenz der Standardverteilung als Maß des Gesamtrisikos von rund -57 Prozent von dem aggregierten Risiko auf Basis von Korrelationen, die mit dem Kostenmodell kalkuliert wurden, zum aggregierten Risiko, das nur auf Basis von Korrelationen mit dem Wert 0 berechnet wird, ermittelt. Hierbei werden die Werte auf die Größen des Risikos bezogen, dessen Korrelationen mittels Kostenmodell berechnet wurden. Im Vergleich zu den historischen Daten ergibt sich eine Differenz von rund +3 Prozent, wodurch die Ermittlung mit dem Kostenmodell verifiziert wird. Die Validierung wird mit einer Überprüfung der Erfüllung der Anforderungen, die an die Methodik gestellt werden, abgeschlossen. Es kann gezeigt werden, dass ein Großteil der Anforderungen erfüllt wird, wobei Einschränkungen aufgrund zu priorisierender Zielkonflikte und zu betrachtender Systemgrenzen getätigt werden müssen.

Für die weitere Verwendung wird eine laufende Verifikation der Korrelationen mit aktuellen Angeboten empfohlen, das diese Überprüfung auf eine breitere Datenbasis heben und auch Auslöser für eine Adaption an neue Zusammenhänge und Abhängigkeiten im Anwendungsfall sein kann. Zusätzlich kann eine Risikoprognose in Form von Wahrscheinlichkeiten nur anhand einer zukünftigen Stichprobenmenge in Form einer Überprüfung der in der Vergangenheit getroffenen Prognosen validiert werden.

6.2 Ausblick

6.2.1 Mögliche Erweiterung der Systemgrenzen

Die vorgestellte Methodik bezieht sich auf die Dimensionierung von Fabriken, wobei sowohl der Einkauf der Einzelteile, Aggregate und Module als auch die Kostenbewertung der Dimensionierungsgrößen nicht mitbetrachtet werden. Im Zuge der weiterführenden Forschung bietet sich die Arbeit als Grundlage an, sowohl die Entwicklung eines übergreifenden Frameworks zur Berücksichtigung aller Gewerke voranzutreiben, als auch die Methodik in bestehende übergreifende Ansätze (vgl. beispielsweise Touran (2014), Bakhshi & Touran (2012) und Rimpau (2010)) zu integrieren, wobei weiterhin die detaillierte Betrachtung von Korrelationen eine besondere Herausforderung darstellt. Ebenfalls wird die Möglichkeit für eine Gesamtrisikobetrachtung aller Produkte an einem spezifischen Standort mit der Basis der hier beschriebenen Risikobetrachtung je Produkt geschaffen. In diesem Zusammenhang werden die Korrelationen beispielsweise durch die gemeinsame Nutzung von Ressourcen und Prozessen einen entscheidenden Faktor zur Risikoanalyse darstellen, den es zu untersuchen und gegebenenfalls zu modellieren gilt.

In dieser Arbeit wird die Normalverteilung zur Quantifizierung von Unsicherheiten mathematisch, anwendungsorientiert und auf Basis von veröffentlichten Forschungsergebnissen begründet. Eine zusätzliche Möglichkeit zur Verbesserung der Methodik besteht in der Überprüfung der Auswahl der Wahrscheinlichkeitsverteilung zur Unsicherheitsquantifizierung auf Basis eines umfangreichen historischen Datensatzes, der beispielsweise in der Baubranche (vgl. Wall (1997)) anhand mehrfacher Umsetzungen ähnlicher Projekte verfügbar ist, jedoch selten in der Automobilbranche. Bei der Kombination von verschiedenen Wahrscheinlichkeiten ist die Wahl des Korrelationskoeffizienten und der Risikoaggregation zu überprüfen. Gegebenenfalls kann auch an einer Vereinfachung der Einflussgrößenmodelle gearbeitet werden, indem mehrere Größen zu einem gemeinsamen Faktor kombiniert werden.

6.2.2 Mögliche zukünftige Entwicklungen

Es existieren viele Bestrebungen, den europäischen Produktionsstandort trotz des steigenden Kosten- und Konkurrenzdrucks zu sichern. Vielfach werden diese Bestrebungen unter dem Schlagwort Industrie 4.0 zusammengefasst (vgl. Ramsauer (2013a, S. 6)). Neben der Übertragung aktueller Trends aus der Informations- und Kommunikationstechnologie in Anwendung der Produktion, wird der Fokus auf die Weiterentwicklung von Planungs- und Erklärungsmodellen gelegt (vgl. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft (2013, 39 ff.)). Im Zuge von immer kürzer werdenden Produktlebenszeiten, Produktentwicklungszeiten und einer steigenden Modell-

und Variantenvielfalt gilt es hierbei, das Planungssystem möglichst agil aufzustellen, damit die Planungsaktivitäten effizient durchgeführt werden können und weiterhin wettbewerbsfähige Dimensionierungen und Kosten den Output darstellen. Diese Arbeit bietet hierfür einen Beitrag, um die systembedingten Unsicherheiten zu quantifizieren und für Entscheidungen berücksichtigen zu können.

Literaturverzeichnis

- Aderoba, A. (1997), A generalised cost-estimation model for job shops, *in: International Journal of Production Economics*, Vol. 53, S. 257 – 263.
- Anderson, D. M. (1990), *Design for Manufacturability & Concurrent Engineering*, Cambria, CIM Press.
- Anscombe, F. J. (1973), Graphs in Statistical Analysis, *in: The American Statistician*, Vol. 21, No. 1, S. 17 – 21.
- Bakhshi, P. & Touran, A. (2012), A Method for Calculating Cost Correlation among Construction Projects in a Portfolio, *in: International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, Vol. 1, No. 2, S. 134 – 141.
- Bamberg, G., G, A. & Coenenberg, M. K. (2012), *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre*, 15. Aufl., München: Verlag Franz Vahlen GmbH.
- Berk, J. & DeMarzo, P. (2007), *Corporate Finance*, Boston: Pearson Education, Inc.
- Bibliographisches Institut GmbH (2013a), *Duden online*, [online] <http://www.duden.de/rechtschreibung/Methode> [13.07.2014].
- Bibliographisches Institut GmbH (2013b), *Duden online*, [online] <http://www.duden.de/suchen/dudenonline/methodik> [13.07.2014].
- Blum, U. (2001), Risiko aus volkswirtschaftlicher Sicht, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 409 – 424.
- Bortz, J. & Döring, N. (2006), *Forschungsmethoden und Evaluation*, 4. Aufl., Heidelberg, Springer Medizin Verlag.
- Bracht, U., Geckler, D. & Wenzel, S. (2011), *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Brechmann, E. C. & Schepsmeier, U. (2013), Modeling Dependence with C- and D-Vine Copulas: The R Package CDVine, *in: Journal of Statistical Software*, Volume 52, Issue 3, S. 1 – 27.
- Brieke, M. (2009), *Erweiterte Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Fabrikplanung*, Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität.

- Bronstein, I. N., Semendjajew, K. A., Musiol, G. & Mühlig, H. (2000), *Taschenbuch der Mathematik*, Frankfurt: Verlag Harri Deutsch.
- Buch, A., Dorfleitner, G. & Wimmer, M. (2011), Risk capital allocation for rorac optimization, in: *Journal of Banking and Finance* 35, S. 3001 – 3009.
- Buzacott, J. A., Corsten, H., Gössinger, R. & Schneider, H. M. (2013), *Production Planning and Control. Basics and Concepts*, München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Carr, R. I. (1989), Cost-Estimating Principles, in: *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 115, No. 4, S. 545 – 551.
- Cech, C. (2006), *Copula-based top-down approaches in financial risk aggregation*, [online] Working Paper Series by the University of Applied Sciences of bfi Vienna <http://www.fh-vie.ac.at/Forschung/Publikationen/Workingpapers/Copula-based-top-down-approaches-in-financial-risk-aggregation> [10.03.2014].
- Chapman, C. & Ward, S. (2003), *Project Risk Management. Processes, Techniques and Insights*, 2. Aufl., Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Cho, S. (2006), An exploratory project expert system for eliciting correlation coefficient and sequential updating of duration estimation, in: *Expert System with Application*, Vol. 30, S. 553 – 560.
- Chou, J.-S. (2009), Web-based CBR system applied to early cost budgeting for pavement maintenance project, in: *Expert System with Application*, Vol. 36, S. 2947 – 2960.
- Chou, J.-S. (2011), Cost simulation in an item-based project involving construction engineering and management, in: *International Journal of Project Management*, Vol. 29, S. 706 – 717.
- Chou, J.-S., Yang, I.-T. & Chong, W. K. (2009), Probabilistic simulation for developing likelihood distribution of engineering project cost, in: *Automation in Construction*, Vol. 18, S. 570 – 577.
- Chua, D. K. H., Li, D. Z. & Chan, W. T. (2001), Case-based reasoning approach in bid decision making, in: *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 127, No. 1, S. 35 – 45.
- Chulani, S., Boehm, B. & Steece, B. (1999), Bayesian Analysis of Empirical Software Engineering Cost Models, in: *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 25, No. 4, s. 573 – 583.
- Cooper, D. F., Grey, S., Raymand, G. & Walker, P. (2005), *Project Risk Management Guidelines. Managing Risk in Large Projects and Complex Procurements*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd.

- Deutsch, H.-P. (2008), *Derivate und Interne Modelle*, 4. Aufl., Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft Steuern Recht GmbH.
- Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (Hrsg.) (2014), *KVP - Der Kontinuierliche Verbesserungsprozess. Praxisleitfaden für kleine und mittlere Organisationen*, München: Carl Hanser Verlag.
- Dowd, K. (1998), *Beyond Value At Risk. The New Science of Risk Management*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Duverlie, P. & Castelain, J. M. (1999), Cost Estimation During Design Step: Parametric Method versus Case Based Reasoning Method, in: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 15, Issue 12, S. 895 – 906.
- Elkjaer, M. (2000), Stochastic Budget Simulation, in: *International Journal of Project Management*, Vol. 18, S. 139 – 147.
- Embrechts, P., Lindskog, F. & McNeil, A. (2003), Modelling Dependence with Copulas and Applications to Risk Management, in: Svetlozar T. Rachev (Ed.), *Handbook of Heavy Tailed Distributions in Finance*, Amsterdam: Elsevier Science B.V., S. 329 – 384.
- Embrechts, P., McNeil, A. & Straumann, D. (2002), Correlation and dependence in risk management: properties and pitfalls, in: M.A.H. Dempster (Ed.), in: *Risk Management: Value at Risk and Beyond*, Cambridge: Cambridge University Press, S. 176 – 223.
- Erichsen, J. & Riederer, W. H. (2014), *Praxiswissen Angebote und Kalkulationen. Rechtssicherheit von Kundenanfrage bis zur Lieferung*, Freiburg: Haufe-Lexware GmbH Co. KG.
- Farineau, T., Rabenasolo, B., Castelain, J. M., Meyer, Y. & Duverlie, P. (2001), Use of Parametric Models in an Economic Evaluation Step During the Design Phase, in: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 17, S. 79 – 86.
- Fieten, R. (1991), *Erfolgsstrategien für Zulieferer: Von der Abhängigkeit zur Partnerschaft Automobil- und Kommunikationsindustrie*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH.
- Fisher, R. A. (1915), Frequency Distribution of the Value of the Correlation Coefficient in Samples from an Indefinitely Large Population, in: *Biometrika*, Vol. 10, No. 4, S. 507 – 521.
- Fisher, R. A. (1921), On the „Probable Error“ of a Coefficient of Correlation Deduced from a Small Sample, in: *Metron*, Vol. 1, S. 3 – 32.
- Glauser, M. (2003), *Messung von Marktrisiken unter Verwendung von Copulafunktionen. Eine empirische Studie für den Schweizer Aktienmarkt*, Dissertation, Universität Freiburg in der Schweiz.

- Gleißner, W. (2001), Identifikation, Messung und Aggregation von Risiken, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 111 – 137.
- Gleißner, W. (2004), Die Aggregation von Risiken im Kontext der Unternehmensplanung, in: *ZfCM - Zeitschrift für Controlling Management*, 48. Jg., H. 5, S. 350 – 359.
- Gleißner, W. (2014), Wahrscheinlichkeiten, Bayes-Theorem und statistische Analysen, in: *Controller Magazin*, Ausgabe 2, März/April, S. 68 – 74.
- Gleißner, W. & Meier, G. (2001), Risiko-Management als integraler Bestandteil der wertorientierten Unternehmensführung, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 53 – 62.
- Gleißner, W. & Wolfrum, M. (2001), Risiko: Grundlagen aus Statistik, Entscheidungs- und Kapitalmarkttheorie, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 138 – 160.
- Grundig, C.-G. (2013), *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendungen*, 4. Aufl., München: Carl Hanser Verlag.
- Gudmundsson, S. (2014), *General Aviation Aircraft Design. Applied Methods and Procedures*, Waltham: Elsevier Inc.
- Gunkel, M. A. (2010), *Effiziente Gestaltung des Risikomanagements in deutschen Nicht-Finanzunternehmen. Eine empirische Untersuchung*, Dissertation, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.
- Gutenberg, E. (1951), *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1: die Produktion*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Hamaker, J. (1995), Parametric Estimating, in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 233 – 266.
- Hartung, J. (2009), *Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, 15. Aufl., München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Hartung, J. & Elpelt, B. (2007), *Multivariate Statistik. Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik*, 7. Aufl., München, Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.
- Heigl, K. M. & Rennhak, C. (2008), *Zukünftige Wettbewerbsstrategien für Automobilzulieferer. Chancen und Risiken der dritten Revolution in der Automobilindustrie*, Stuttgart: ibidem-Verlag.
- Higham, N. J. (2002), Computing the nearest correlation matrix - a problem from finance, in: *IMA Journal of Numerical Analysis*, Vol. 22, S. 329 – 343.

- Hull, J. C. (2012), *Optionen, Futures und andere Derivate*, 8. Aufl., München: Pearson Deutschland GmbH.
- Ihme, J. (2006), *Logistik im Automobilbau*, München, Wien: Carl Hanser Verlag.
- Iman, R. L. & Conover, W. J. (1982), A Distribution-Free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables, in: *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, Vol. 11, Issue 3, S. 311 – 334.
- International Organization of Motor Vehicle Manufacturer (2014), *Production Statistics*, [online] <http://www.oica.net/category/production-statistics/> [01.08.2014].
- Jennrich, R. I. (1970), An Asymptotic χ^2 Test for the Equality of Two Correlation Matrices, in: *Journal of the American Statistical Association*, Volume 65, Issue 330, S. 905 – 912.
- Johannes, J. D. (1995), Artificial Intelligence in Cost Estimating, in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 633 – 646.
- Kaiser, T. & Köhne, M. F. (2007), *Operationelle Risiken in Finanzinstituten. Eine praxisorientierte Einführung*, 2. Aufl., Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler | GWV Fachverlage GmbH.
- Khodakarami, V. & Abdi, A. (2014), Project cost risk analysis: A Bayesian networks approach for modeling dependencies between cost items, in: *International Journal of Project Management*, Vol. 32, Issue 7, S. 1233 – 1245.
- Klug, F. (2010), *Logistikmanagement in der Automobilindustrie. Grundlagen der Logistik im Automobilbau*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Knight, F. H. (1921), *Risk, Uncertainty and Profit*, Kissimmee: Signalman Publishing.
- Koonce, D. A., Gandhi, R. P., Nambiar, A. N. & Judd, R. P. (2006), Identifying and removing error in hierarchical cost estimates, in: *International Journal of Production Economics*, 109 (2007), S. 41 – 52.
- Kreyszig, E. (1979), *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*, 7. Aufl., Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.
- Kreyszig, E. (1999), *Advanced Engineering Mathematics*, 8. Aufl., New York: John Wiley & Sons Inc.
- Krug, W. & Rose, O. (2011), Optimierung, in: März L., Krug W., Rose O. & Weigert G. (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 21 – 28.
- Kruschwitz, L. (2011), *Investitionsrechnung*, 13. Aufl., München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

- Kurowicka, D. & Cooke, R. (2006), *Uncertainty Analysis with High Dimensional Dependence Modelling*, Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- Kurowicka, D. & Cooke, R. M. (2001), Conditional, Partial and Rank Correlation for the Elliptical Copula; Dependence Modelling in Uncertainty Analysis, in: Zio, E., Demiche-
la M. & Piccinini N. (Hrsg.), *Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability ESREL 2001* Vol. 1, S. 1795 – 1802.
- Kuster, J., Huber, E., Lippmann, R., Schmid, A., Schneider, E., Witschi, U. & Wüst, R. (2011), *Handbuch Projektmanagement*, 3 Aufl, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Laux, H., Gillenkirch, R. M. & Schenk-Mathes, H. Y. (2012), *Entscheidungstheorie*, 8. Aufl., Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Leung, A. H.-Y. (2009), *Portfolio Selection and Risk Management: An Introduction, Empirical Demonstration and R-Application for Stock Portfolios*, Masterarbeit, University of California.
- Lovett, J. N. (1995), Cost Estimating in Manufacturing , in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 407 – 444.
- Lurie, P. M., Goldberg, M. S. & Robinson, M. S. (1993), *A Handbook of Cost Risk Analysis Methods*, Alexandria: Institut for Defense Analyses.
- Markowitz, H. M. (1959), *Portfolio Selection. Efficient Diversification of Investment*, New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Müller, E. (2014), *Qualitätsmanagement für Unternehmer und Führungskräfte. Was Entscheider wissen müssen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Möller, N. (2007), *Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme*, Dissertation, Technische Universität München.
- Mott, B. P. (2001), Organisatorische Gestaltung von Risiko-Managementsystemen, in: *Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 199 – 232.
- März, L. & Weigert, G. (2011), Simulationsgestützte Optimierung, in: März L., Krug W., Rose O. & Weigert G. (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 3 – 12.
- Neumann, K. (1996), *Produktions- und Operations-Management*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

- Niazi, A., Dai, J. S., Balabani, S. & Seneviratne, L. (2006), Product Cost Estimation: Technique Classification and Method Review, *in: Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 128, S. 563 – 575.
- Niehof, M. (2009), *Modellierung von stochastischen Abhängigkeiten mittels Copulas*, Diplomarbeit, Westfälische Wilhelms-Universität Münster.
- OVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik (2008), *ÖVE/ÖNORM EN 62264-1:2008 Teil 1. Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen: Modelle und Terminologie*, [online] <https://www.ove.at/webshop/artikel/b85fa23b20-ove-onorm-en-62264-1-2008-07-01.html> [30.07.2013].
- Pawellek, G. (2008), *Ganzheitliche Fabrikplanung. Grundlagen, Vorgehensweisen, EDV-Unterstützung*, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.
- Pine, B. J. (1993), *Mass Customization. The New Frontier in Business Competition*, Boston: Harvard Business School Press.
- Porter, M. E. (2008), *Wettbewerbsstrategie. Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten*, Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft - Wissenschaft (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*, Frankfurt: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
- Pruscha, H. (2006), *Statistisches Methodenbuch. Verfahren, Fallstudien, Programmcodes*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Rabe, M., Spieckermann, S. & Wenzel, S. (2008), *Verifikation und Validierung für die Simulation in der Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Raftery, J. (1994), *Risk Analysis in Project Management*, London: E. & F.N. Spon.
- Ramsauer, C. (2009), *Production Strategy. Mastering the Dynamic of Globalization*, Graz: Verlag der Technischen Universität Graz.
- Ramsauer, C. (2013a), Industrie 4.0 - Die Produktion der Zukunft, *WINGbusiness* 3, S. 6 – 12.
- Ramsauer, C. (2013b), *Industriewissenschaftliches Forschungsmanual*, [online] http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/I3710/files/Downloads/Industriewissenschaftliches_Forschungsmanual.pdf [30.07.2014].
- Reh, G. (2001), Ablaufplan: Einführung eines Risiko-Managementsystems, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 27 – 42.

- Riley, N. M. (1995), Risk Analysis for Cost/Schedule/Technical Performance , in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 267 – 316.
- Rimpau, C. (2010), *Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte*, Dissertation, Technische Universität München.
- Rogler, S. (2002), *Risikomanagement im Industriebetrieb. Analyse von Beschaffungs-, Produktions- und Absatzrisiken*, Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag GmbH.
- Romeike, F. (2004), *Lexikon Risiko-Management*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Rose, O. & März, L. (2011), Simulation, in: März L., Krug W., Rose O. & Weigert G. (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 13 – 19.
- Roy, R., Souchoroukov, P. & Shehab, E. (2011), Detailed cost estimating in the automotive industry: Data and information requirements, in: *International Journal of Production Economics*, Vol. 133, S. 694 – 707.
- Schenk, M., Wirth, S. & Müller, E. (2004), *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige und vernetzte Fabrik*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schmalenbach, E. (1919), Selbstkostenrechnung, in: *Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung*, Jg. 13, S. 277 – 299.
- Schmidt, H. (2008), *VDI-Studie zum Angebotsmanagement. Ergebnisse einer Umfrage bei ca. 300 Industrieunternehmen im B2B-Geschäft*, [online] www.vdi.de/uploads/media/Ergebnis_der_VDI-Studie_Angbotsmanagement_01.pdf [06.03.2014].
- Schneeweiß, C. (1987), *Einführung in die Produktionswirtschaft*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schuh, G. & Kampker, A. (2011), *Strategie und Management produzierender Unternehmen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Schuh, G., Schlick, C., Schmitt, R., Lenders, M., Bender, D., Bohl, A., Gärtner, T., Hatfield, S., Müller, J. & Mütze-Niewöhner, S. (2008), *Systemunabhängige Referenzprozesse für das PLM. Handbuch TFB 57*, Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, ISBN: 978-3-926690-16-6.
- Schwaiger, W. S. (2013), *IFRS-Finanzmanagement: Kosten- und Leistungsrechnung*, Wien: Institut für Managementwissenschaften.

- Semmler, H.-C. (2001), Risikoaggregation als Voraussetzung für eine wertorientierte Unternehmensführung, in: Gleißner W. & Meier G. (Hrsg.), *Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel*, Wiesbaden: Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler GmbH, S. 447 – 455.
- Shuford, R. H. (1995), Activity-Based Costing and Traditional Cost Allocation Structures, *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 41 – 96.
- Simon, H. A. (1954), Spurious Correlation: A Causal Interpretation, in: *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 49, No. 267, S. 467 – 479.
- Souchoroukov, P. (2004), *Improvement of Cost Estimating Internal Practice*, Dissertation, Cranfield University.
- Spur, G. (2001), Begriffe der Fertigungstechnik sind genormt, in: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 96 (9), S. 509.
- Stachowiak, H. (1973), *Allgemeine Modelltheorie*, Wien: Springer-Verlag.
- Staud, J. L. (2006), *Geschäftsprozessanalyse. Ereignisgesteuerte Prozessketten und projektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware*, 3 Aufl., Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Steiger, J. H. (1980), Testing pattern hypotheses on correlation matrices: alternative statistics and some empirical results, in: *Multivariate Behavioral Research*, 15, S. 335 – 352.
- Steiner, F. (2006), *Kennzahlen als Instrument zur Steuerung des Produktionsbereichs*, Norderstedt: GRIN Verlag.
- Steward, R. D. (1995a), Detailed Cost Estimating, in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 193 – 232.
- Steward, R. D. (1995b), Fundamentals of Cost Estimating, in: Steward R. D. et al. (Hrsg.), *Cost Estimator's Reference Manual*, 2. Aufl., New York: John Wiley & Sons, Inc., S. 1 – 40.
- Sudhoff, W. (2007), *Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion*, Dissertation, Technische Universität München.
- Swoboda, P., Stepan, A. & Zechner, J. (2004), *Kostenrechnung und Preispolitik. Eine Einführung mit Beispiel und Lösungen*, 22. Aufl., Wien: Linde Verlag.
- The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004a), *Enterprise Risk Management. Integrated Framework. Application Techniques*,

- [online] http://www.cpa2biz.com/AST/Main/CPA2BIZ_Primary/InternalControls/COSO/PRDOVR~PC-990015/PC-990015.jsp [05.08.2013].
- The Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission (2004b), *Enterprise Risk Management. Integrated Framework. Executive Summary and Framework*, [online] http://www.cpa2biz.com/AST/Main/CPA2BIZ_Primary/InternalControls/COSO/PRDOVR~PC-990015/PC-990015.jsp [05.08.2013].
- Thommen, J.-P. & Achleitner, A.-K. (2003), *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*, 4. Aufl., Betriebswirtschaftlicher Verlag Dr. Th. Gabler/GWV Fachverlage GmbH.
- Touran, A. (1993), Probabilistic Cost Estimating with Subjective Correlations, in: *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 119, No. 1, S. 58 – 71.
- Touran, A. (2014), A Mathematical Structure for Modeling Uncertainty in Cost, Schedule, and Escalation Factor in a Portfolio of Projects, in: *Proceedings of Construction Research Congress 2014: Construction in a Global Network*, Vol. 1, S. 1743 – 1751.
- Touran, A. & Suphot, L. (1997), Rank Correlations in Simulating Construction Costs, in: *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 123, No. 3, S. 297 – 301.
- Touran, A. & Wiser, E. P. (1992), Monte Carlo Technique with Correlated Random Variables, in: *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 118, No. 2, S. 258 – 272.
- Töpfer, A. (2009), *Erfolgreich Forschen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Tufte, E. R. (2001), *The Visual Display of Quantitative Information*, 2nd Edition, Cheshire: Graphics Press.
- Unzeitig, W. (2014), *Verfahren zur Berücksichtigung des Risikos bei der frühen Fabrikplanung*, Patentschrift A 568/2014.
- Unzeitig, W., Rubesa, J., Schafler, M., Stocker, A., Ramsauer, C. & Flasch, M. (2014), Eine Methode zur Berücksichtigung von Unsicherheit im Zuge der frühen Fabrikplanung in der Auftragsfertigung von Gesamtfahrzeugen, in: *Journal e & i Elektrotechnik und Informationstechnik*, Volume 131, Issue 7, S. 212 – 218.
- Unzeitig, W., Schafler, M., Sams, C. & Flasch, M. (2013), Methodik für die frühe Produktionsplanungsphase auf der Basis von szenarienbasierter Variantenbewertung am Beispiel eines Auftragsfertigers für Gesamtfahrzeugproduktion, in: Zsifkovits H. E. & Altendorfer S. (Hrsg.), *Logistics Systems Engineering : 1. Wissenschaftlicher Industrielogistik-Dialog in Leoben*, 1, S. 71 – 84.

- Unzeitig, W., Schafler, M., Stocker, A., Weghofer, F. & Flasch, M. (2014), An Instrument for Reducing Uncertainty in the Early Phase of Production Planning, *in: Proceedings of the 6th International Scientific Conference Management of Technology Step to Sustainable Production*, Vol. 6, N/A.
- van Drop, J. R. & Kotz, S. (2002), A novel extension of the triangular distribution and its parameter estimation, *in: The Statistician*, Vol. 21, Part 1, S. 63 – 79.
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2008), *VDI 4499 Blatt 1. Digitale Fabrik. Grundlagen*, Berlin: Beuth (Februar 2008).
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2010), *VDI 3633 Blatt 1. Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen. Grundlagen*, Berlin: Beuth (Dezember 2010).
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2011a), *VDI 4499 Blatt 2. Digitale Fabrik. Digitale Fabrikbetrieb*, Berlin: Beuth (Mai 2011).
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2011b), *VDI 5200 Blatt 1. Fabrikplanung. Planungsverfahren*, Berlin: Beuth (Februar 2011).
- Wall, D. M. (1997), Distribution and Correlation in Monte Carlo Simulation, *in: Construction Management and Economics*, Vol. 15, Issue 3, S. 241 – 258.
- Wang, W.-C. (2002a), SIM-UTILITY: Model for Project Ceiling Price Determination, *in: Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 128, S. 76 – 84.
- Wang, W.-C. (2002b), Simulation-Facilitated Model for Assessing Cost Correlations, *in: Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, Vol. 17, S. 368 – 380.
- Wang, W.-C. & Demesetz, L. A. (2000), Model for evaluating networks under correlated uncertainty - netcor, *in: Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 126, S. 458 – 466.
- Weigert, G. & Rose, O. (2011), Stell- und Zielgrößen, in: März L., Krug W., Rose O. & Weigert G. (Hrsg.), *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, S. 29 – 39.
- Westkämper, E. (2006), *Einführung in die Organisation der Produktion*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Wiendahl, H.-H. (2011), *Auftragsmanagement der industriellen Produktion. Grundlagen, Konfiguration, Einführung*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Wiendahl, H.-P., Reichardt, J. & Nyhuis, P. (2009), *Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*, München Wien: Carl Hanser Verlag.
- Wolke, T. (2013), *Risikomanagement*, 2. Aufl., München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

- Womack, J. P., Jones, D. T. & Roos, D. (1990), *The Machine that Changed the World. The Story of Lean Production - Toyota's Secret Weapon in the Global Car Wars that is Revolutionizing World Industry*, New York: Free Press, A Division of Simon & Schuster, Inc.
- Yang, I.-T. (2004), Simulation-based estimation for correlated cost elements, *in: International Journal of Project Management*, Vol. 23, S. 275 – 282.
- Yang, I.-T. (2008), Distribution-Free Monte Carlo Simulation: Premise and Refinement, *in: Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 134, S. 352 – 360.
- Yang, I.-T. (2011), Stochastic time-cost tradeoff analysis: A distribution-free approach with focus on correlation and stochastic dominance, *in: Automation in Construction*, Vol. 20, S. 916 – 926.
- Zentis, T. & Schmitt, R. (2013), Technisches Risikomanagement bei Produktinnovationen, *in: Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, Jg. 108, Nr. 05/2013, S. 336 – 340.
- Zhang, G., Shang, J. & Li, W. (2011), Collaborative production planning of supply chain under price and demand uncertainty, *in: European Journal of Operational Research*, 215, S. 590 – 603.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. & Zhu, J. Z. (2013), *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*, 7. Aufl., Oxford: Elsevier Ltd.
- Zschorn, L. (2007), *Quantifizierung von Unsicherheiten in auftragsbezogenen Produktionsnetzen*, Dissertation, Technische Universität Chemnitz.
- Zunk, B. M., Grbenic, S. & Bauer, U. (2013), *Kostenrechnung. Einführung - Methodik - Anwendungsfälle*, Wien: LexisNexis Verlag ARD Orac GmbH & Co KG.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Übersicht über die Fabrikplanungsphasen	13
1.2	Forschungsdesign	19
2.1	Überblick über die Vorgehensweise zur Erhebung der Grundlagen und des Stands der Technik in Hinblick auf das gegebene Forschungsthema	22
2.2	Überschneidung der Fachgebiete Fabrikplanung, Angebotslegung, Risiko- management und statistische Methoden, die auf eine Methodik zur Quanti- fizierung von Unsicherheiten in der frühen Fabrikplanungsphase entschei- denden Einfluss haben	23
2.3	Darstellung der Transformation von Input zu Output durch Produktion	24
2.4	Darstellung der Transformation von Input zu Output durch die Herstellung als Teil der Produktion	25
2.5	Darstellung der fünf grundlegenden Wettbewerbskräfte nach Porter	26
2.6	Die Projekttypen der Fabrikplanung	27
2.7	Darstellung der festgelegten und verursachten Kosten im Zuge der Fabrik- planung	29
2.8	Darstellung der Prozessschritte der Digitalen Fabrik	30
2.9	Informationen der Produktdefinition für die Produktion	32
2.10	Merkmale eines Modells	33
2.11	Darstellung der Hauptprozessschritte eines generischen Angebotsprozesses	37
2.12	Darstellung der in dieser Arbeit verwendeten Möglichkeiten zu Kostenun- terscheidungen	40
2.13	Einteilung der Methoden zur Vorkalkulation von Kosten	42
2.14	Anforderungen der Fabrikplanung an die Methoden der Vorkalkulation von Kosten	53
2.15	Übersicht über Erfüllung der Anforderung der frühen Fabrikplanungspha- se durch die unterschiedlichen Methoden zur Vorkalkulation von Kosten basierend auf der Literaturstudie dieser Arbeit	56
2.16	Darstellung der Abweichung vom Zielwert als Gefahr oder Chance	58
2.17	Unterscheidung der Unsicherheiten in Risiken und „wahre“ Unsicherheiten	59
2.18	Grundlegende Prozessschritte des Risikomanagements	61
2.19	Einteilungsmöglichkeiten der Risiken in deren Auswirkung und Wahr- scheinlichkeit unter Berücksichtigung der Risikoneigung des Unternehmens	62
2.20	Grundlegende Unterscheidung der Risiken	64

2.21	Einteilung der grundlegenden Maßnahmen des Risikomanagements	65
2.22	Kategorisierung der Risiken bei der Herstellung von Produkten in Inputrisiken, Prozessrisiken und Outputrisiken	66
2.23	Unterteilung der mathematischen Statistik in deskriptive, induktive Statistik und Wahrscheinlichkeitsrechnung	68
2.24	Dichtefunktion f_X der Gleichverteilung $U(2, 7)$	72
2.25	Verteilfunktion F_X der Gleichverteilung $U(2, 7)$	73
2.26	Dichtefunktion f_X der Normalverteilung $N(81, 1)$	73
2.27	Verteilfunktion F_X der Normalverteilung $N(81, 1)$	74
2.28	Unterscheidung der Ausprägungsart des Scatterplots von zwei abhängigen Variablen x und y	81
2.29	Beispiele für Regressionsanalysen mit demselben Ergebnis für die Regressionsgerade	82
2.30	Kategorisierung der Korrelationen	88
2.31	Darstellung des Bereichs des Korrelationskoeffizienten	93
3.1	Vorgehen zur Methodik- und Modellentwicklung	100
3.2	Darstellung der Lessons-Learned-Schleifen zwischen den Fabrikplanungsphasen	104
3.3	Systemgrenzen der erarbeiteten Methodik für die frühe Fabrikplanung . . .	106
3.4	Darstellung der Prozessschritte der Digitalen Fabrik im Zuge der frühen Fabrikplanung	106
3.5	Überblick über die Einteilungen von Unsicherheiten und deren Ursachen für das Auftreten im Zuge der Fabrikplanung	109
3.6	Überblick über die Aufteilung der Produktkosten im Zuge der Produktion . .	110
3.7	Schematische Darstellung der Planungsebenen in der Fabrikplanung . . .	121
3.8	Systematische Darstellung der Input- und Outputdaten des mathematischen Modells zur Berücksichtigung der Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung	124
3.9	Darstellung der Dichtefunktion der Normalverteilung am Beispiel der Dimensionierungsgröße Fläche	127
3.10	Darstellung der Ratingskala für die Auswirkungen des Inputwertes auf die Detaildimensionierungsgröße	132
3.11	Darstellung der Hauptprozessschritte zur Ermittlung der Korrelationen der Dimensionierungsgrößen im Zuge der frühen Fabrikplanung	141
3.12	Darstellung des Einflusses der Größe des Korrelationskoeffizienten und des Größenverhältnisses der Varianzen der betrachteten korrelierenden Größen auf die Kovarianz	145

3.13	Darstellung des prozentuellen Einflusses des Größenverhältnisses der Varianzen der betrachteten korrelierenden Größen auf die Kovarianz und den Mittelwert der Varianzen unter der Annahme eines konstanten Korrelationskoeffizienten mit Wert 1	146
3.14	Darstellung der Hauptprozessschritte zur Quantifizierung und Aggregation der Unsicherheiten der Dimensionierungsgrößen im Zuge der frühen Fabrikplanung	151
3.15	Darstellung der Verteilung der Gesamtkosten eines Angebotspreises anhand eines fiktiven Beispiels	154
3.16	Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikoerhöhung am fiktiven Beispiel	156
3.17	Darstellung der Verteilung der Gesamtkosten eines Angebots mit definierten α -Quantilen an einem fiktiven Beispiel	157
3.18	Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikoerhöhung im allgemeinen Fall anhand des Verhältnisses Erwartungswert zu Standardabweichung	158
3.19	Darstellung des VaR zur Auswertung des Risikos anhand eines fiktiven Beispiels	159
3.20	Darstellung der Verteilung des Gesamtrisikos und der Detailrisiken anhand eines fiktiven Beispiels mit insgesamt sechs Dimensionsgrößen	159
3.21	Auswertung der Varianzen anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels	160
3.22	Auswertung der Kovarianzen anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels	161
3.23	Auswertung der Korrelationskoeffizienten anhand einer Paretodarstellung eines fiktiven Beispiels	162
3.24	Darstellung der normierten Varianz-Kovarianzmatrix mit allen Kovarianzen, die mit einer spezifischen Dimensionierungsgröße in Verbindung stehen, anhand eines fiktiven Beispiels	163
3.25	Prozessschritte im Zuge der Analyse des Gesamtrisikos und der Einflüsse der Detailrisiken	164
3.26	Hauptprozessschritte im Zuge der Gesamtmethodik zur Quantifizierung und Aggregation von Unsicherheiten im Zuge der frühen Fabrikplanung	165
4.1	Vorgehen im Anwendungsfall	168
4.2	Spezifische Herausforderungen eines Auftragsfertigers von Gesamtfahrzeugen im Zuge der frühen Fabrikplanung	174
4.3	Beispielhafte Einflussmatrix von 4 Einflussfaktoren auf die Dimensionierungsgrößen Personal Rohbau und Betriebsmittel Montage	176
4.4	Auswertung der Korrelationskoeffizienten anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls	184

4.5	Auswertung der Varianzen anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls	185
4.6	Auswertung der (Ko-)Varianzen anhand einer Paretodarstellung des Anwendungsfalls	186
4.7	Darstellung der normierten Varianz-Kovarianzmatrix mit allen Kovarianzen, die mit der Dimensionierungsgröße Flächen Montage F_M in Verbindung stehen, anhand des Anwendungsfalls	187
4.8	Darstellung des VaR zur Auswertung des Risikos anhand des Anwendungsfalls	189
4.9	Darstellung des Potentials zur Preisreduktion im Zuge der Risikoerhöhung im Anwendungsfall	190
5.1	Überblick über die Vorgehensweise zur Verifikation und Validierung der Methodik zur frühen Fabrikplanung bei Unsicherheiten	192
5.2	Häufigkeitsverteilung der Differenz zwischen den Korrelationskoeffizienten der Berechnung und den historischen Daten	197
5.3	Differenzen der Korrelationskoeffizienten der berechneten Werte zu den historischen Daten auf Basis der Korrelationsmatrix	197
5.4	Dichtefunktion f_x der drei Risikoverteilungen: Verteilung inklusive Korrelation der berechneten Werte, Verteilung exklusive Korrelation und Verteilung inklusive Korrelation der historischen Werte	201
5.5	Darstellung der prozentuellen Änderungen der Risikoquantifizierung bei Dimensionierungsgrößen und ihre prozentuellen Auswirkungen auf die Standardabweichung der Gesamtkosten beim Anwendungsfall	203
5.6	Zusammenfassung der graphischen Darstellungen der Dichtefunktion des Gesamtrisikos und ausgewählter Detailrisiken sowie zusätzlicher Überblicksinformationen am Beispiel des Anwendungsfalls	208

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über Methoden zur Vorkalkulation von Kosten	43
2.2	Wahrscheinlichkeiten der Normalverteilung in Abhängigkeit von der Standardabweichung	74
3.1	Überblick über die Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik	103
3.2	Beispielhafter linearer Erwartungswertverlauf eines Portfolios	114
3.3	Beispielhaftes Gesamtergebnis der Fabrikplanung	114
3.4	Gemeinsamkeiten und Unterschiede von Portfolios und Fabrikplanungen im Hinblick auf Unsicherheiten	117
3.5	Überblick über die Annahmen und Vereinfachungen im mathematischen Modell für die frühe Fabrikplanung	122
3.6	Quantifizierung von Unsicherheiten mit Normalverteilungen am Beispiel der Dimensionierungsgröße Fläche	126
3.7	Definition der Ratingskala für die Auswirkungen des Inputwertes auf die Detaildimensionierungsgröße	131
3.8	Definition der Datensätze zur Ermittlung des Korrelationskoeffizienten	138
3.9	Überblick über die theoretische Anforderungserfüllung im mathematischen Modell	150
3.10	Überblick über die Risikobereiche eines fiktiven Angebotswertes	155
3.11	Ermittlung des VaR an einem fiktiven Beispiel	157
4.1	Absolute und relative Wertebereiche der 4 Inputfaktoren im veranschaulichenden Beispiel	180
4.2	Überblick über die Risikobereiche des Anwendungsfalls	188
4.3	Ermittlung des VaR im Anwendungsfall	188
5.1	Minimale und maximale Grenzbereiche der signifikanten Korrelation bei den historischen Daten und einem Signifikanzniveau von 95 Prozent	194
5.2	Minimale und maximale Konfidenzintervalle bei den berechneten sowie historischen Daten für eine Konfidenz von 95 Prozent	195
5.3	Minimal-, Maximalwert, Mittelwert und Median der Korrelationskoeffizienten aller Dimensionierungsgrößen mit der Stückzahl bei den berechneten sowie historischen Daten	199

5.4	Vergleich der Standardabweichung, des Quantils $\xi_{0,95}$ bei 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit und des Quantils $\xi_{0,99}$ bei 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit mit den unterschiedlichen Risikoaggregationen im Anwendungsfall .	200
5.5	Vergleich des Gesamtrisikos und der Detailrisiken im Anwendungsfall anhand der Standardabweichung, des Quantils $\xi_{0,95}$ bei 95-prozentiger Wahrscheinlichkeit und des Quantils $\xi_{0,99}$ bei 99-prozentiger Wahrscheinlichkeit .	209
5.6	Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an das mathematische Modell und die Methodik	210
5.7	Bewertung der Erfüllung der Anforderungen an die Methoden zur Vorkalkulation	211
A.1	Korrelationskoeffizienten im Zuge des Anwendungsfalls	241
A.2	Ermittelte Korrelationskoeffizienten im Zuge der historischen Daten und der Berechnung inklusive der Stichprobenanzahl und des signifikanten Wertebereichs bei einem 95 Prozent Signifikanzniveau	242
A.3	Konfidenzintervalle der Korrelationskoeffizienten für eine Konfidenz mit 95 Prozent	243
A.4	Korrelationskoeffizienten der Dimensionierungsgrößen inklusive Konfidenzintervalle mit der Stückzahl der berechneten Werte sowie der historischen Daten und deren Differenzen	244
A.5	Werte der Dimensionierungsgrößen und deren Unsicherheit im fiktiven Anwendungsfall	244

Anhang

Korrelationskoeffizient	Dimensionierungsgröße 1	Dimensionierungsgröße 2
$r_{P_R F_R}$	Personal Rohbau	Fläche Rohbau
$r_{P_R B_M R}$	Personal Rohbau	Betriebsmittel Rohbau
$r_{P_R P_L}$	Personal Rohbau	Personal Lack
$r_{P_R B_M L}$	Personal Rohbau	Betriebsmittel Lack
$r_{P_R P_M}$	Personal Rohbau	Personal Montage
$r_{P_R F_M}$	Personal Rohbau	Fläche Montage
$r_{P_R B_M M}$	Personal Rohbau	Betriebsmittel Montage
$r_{F_R B_M R}$	Fläche Rohbau	Betriebsmittel Rohbau
$r_{F_R P_L}$	Fläche Rohbau	Personal Lack
$r_{F_R B_M L}$	Fläche Rohbau	Betriebsmittel Lack
$r_{F_R P_M}$	Fläche Rohbau	Personal Montage
$r_{F_R F_M}$	Fläche Rohbau	Fläche Montage
$r_{F_R B_M M}$	Fläche Rohbau	Betriebsmittel Montage
$r_{B_M R P_L}$	Betriebsmittel Rohbau	Personal Lack
$r_{B_M R B_M L}$	Betriebsmittel Rohbau	Betriebsmittel Lack
$r_{B_M R P_M}$	Betriebsmittel Rohbau	Personal Montage
$r_{B_M R F_M}$	Betriebsmittel Rohbau	Fläche Montage
$r_{B_M R B_M M}$	Betriebsmittel Rohbau	Betriebsmittel Montage
$r_{P_L B_M L}$	Personal Lack	Betriebsmittel Lack
$r_{P_L P_M}$	Personal Lack	Personal Montage
$r_{P_L F_M}$	Personal Lack	Fläche Montage
$r_{P_L B_M M}$	Personal Lack	Betriebsmittel Montage
$r_{B_M L P_M}$	Betriebsmittel Lack	Personal Montage
$r_{B_M L F_M}$	Betriebsmittel Lack	Fläche Montage
$r_{B_M L E K_M}$	Betriebsmittel Lack	Betriebsmittel Montage
$r_{P_M F_M}$	Personal Montage	Fläche Montage
$r_{P_M B_M M}$	Personal Montage	Betriebsmittel Montage
$r_{F_M B_M M}$	Fläche Montage	Betriebsmittel Montage

Tab. A.1: Korrelationskoeffizienten im Zuge des Anwendungsfalls

Korrelationskoeffizient	Korrelationskoeffizient der berechneten Werte; Stichprobenanzahl; Grenze der signifikanten Korrelation	Korrelationskoeffizient der historischen Daten; Stichprobenanzahl; Grenze der signifikanten Korrelation
$r_{P_R F_R}$	0,97; 10000; +/-0,01650	0,89; 13; +/-0,4770
$r_{P_R B M_R}$	0,93; 10000; +/-0,01650	0,70; 15; +/-0,4407
$r_{P_R P_L}$	0,84; 10000; +/-0,01650	0,87; 13; +/-0,4770
$r_{P_R B M_L}$	0,66; 10000; +/-0,01650	0,63; 12; +/-0,4968
$r_{P_R P_M}$	0,78; 10000; +/-0,01650	0,88; 13; +/-0,4770
$r_{P_R F_M}$	0,60; 10000; +/-0,01650	0,85; 13; +/-0,4770
$r_{P_R B M_M}$	0,67; 10000; +/-0,01650	0,54; 13; +/-0,4770
$r_{F_R B M_R}$	0,90; 10000; +/-0,01650	0,89; 12; +/-0,4968
$r_{F_R P_L}$	0,83; 10000; +/-0,01650	0,85; 12; +/-0,4968
$r_{F_R B M_L}$	0,57; 10000; +/-0,01650	0,77; 11; +/-0,5208
$r_{F_R P_M}$	0,78; 10000; +/-0,01650	0,93; 12; +/-0,4968
$r_{F_R F_M}$	0,67; 10000; +/-0,01650	0,80; 11; +/-0,5208
$r_{F_R B M_M}$	0,62; 10000; +/-0,01650	0,67; 12; +/-0,4968
$r_{B M_R P_L}$	0,81; 10000; +/-0,01650	0,72; 13; +/-0,4770
$r_{B M_R B M_L}$	0,73; 10000; +/-0,01650	0,88; 13; +/-0,4770
$r_{B M_R P_M}$	0,75; 10000; +/-0,01650	0,81; 13; +/-0,4770
$r_{B M_R F_M}$	0,51; 10000; +/-0,01650	0,57; 12; +/-0,4968
$r_{B M_R B M_M}$	0,67; 10000; +/-0,01650	0,77; 14; +/-0,4570
$r_{P_L B M_L}$	0,78; 10000; +/-0,01650	0,65; 12; +/-0,4968
$r_{P_L P_M}$	0,84; 10000; +/-0,01650	0,97; 13; +/-0,4770
$r_{P_L F_M}$	0,64; 10000; +/-0,01650	0,75; 11; +/-0,5208
$r_{P_L B M_M}$	0,74; 10000; +/-0,01650	0,46; 13; +/-0,4770
$r_{B M_L P_M}$	0,68; 10000; +/-0,01650	0,76; 12; +/-0,4968
$r_{B M_L F_M}$	0,39; 10000; +/-0,01650	0,62; 11; +/-0,5208
$r_{B M_L B M_M}$	0,71; 10000; +/-0,01650	0,87; 13; +/-0,4770
$r_{P_M F_M}$	0,88; 10000; +/-0,01650	0,79; 12; +/-0,4968
$r_{P_M B M_M}$	0,87; 10000; +/-0,01650	0,60; 14; +/-0,4570
$r_{F_M B M_M}$	0,71; 10000; +/-0,01650	0,57; 13; +/-0,4770

Tab. A.2: Ermittelte Korrelationskoeffizienten im Zuge der historischen Daten und der Berechnung inklusive der Stichprobenanzahl und des signifikanten Wertebereichs bei einem 95 Prozent Signifikanzniveau

Korrelationskoeffizient	Korrelationskoeffizient der berechneten Werte; untere Intervallgrenze; obere Intervallgrenze	Korrelationskoeffizient der historischen Daten; untere Intervallgrenze; obere Intervallgrenze
$r_{P_R F_R}$	0,97; 0,9688; 0,9711	0,89; 0,6652; 0,9669
$r_{P_R B M_R}$	0,93; 0,9273; 0,9326	0,70; 0,2927; 0,8923
$r_{P_R P_L}$	0,84; 0,8341; 0,8457	0,87; 0,6127; 0,9605
$r_{P_R B M_L}$	0,66; 0,6488; 0,6709	0,63; 0,0879; 0,8842
$r_{P_R P_M}$	0,78; 0,7722; 0,7876	0,88; 0,6387; 0,9637
$r_{P_R F_M}$	0,60; 0,5873; 0,6124	0,85; 0,5624; 0,9541
$r_{P_R B M_M}$	0,67; 0,6591; 0,6807	0,54; -0,0156; 0,8408
$r_{F_R B M_R}$	0,90; 0,8962; 0,9037	0,89; 0,6461; 0,9690
$r_{F_R P_L}$	0,83; 0,8238; 0,8360	0,85; 0,5391; 0,9570
$r_{F_R B M_L}$	0,57; 0,5566; 0,5831	0,77; 0,3161; 0,9371
$r_{F_R P_M}$	0,78; 0,7722; 0,7876	0,93; 0,7637; 0,9806
$r_{F_R F_M}$	0,67; 0,6591; 0,6807	0,80; 0,3848; 0,9459
$r_{F_R B M_M}$	0,62; 0,6078; 0,6319	0,67; 0,1561; 0,8984
$r_{B M_R P_L}$	0,81; 0,8032; 0,8166	0,72; 0,2801; 0,9100
$r_{B M_R B M_L}$	0,73; 0,7207; 0,7390	0,88; 0,6387; 0,9637
$r_{B M_R P_M}$	0,75; 0,7413; 0,7585	0,81; 0,4678; 0,9410
$r_{B M_R F_M}$	0,51; 0,4954; 0,5244	0,57; -0,0058; 0,8619
$r_{B M_R B M_M}$	0,67; 0,6591; 0,6807	0,77; 0,4048; 0,9234
$r_{P_L B M_L}$	0,78; 0,7722; 0,7876	0,65; 0,1214; 0,8914
$r_{P_L P_M}$	0,84; 0,8341; 0,8457	0,97; 0,9001; 0,9912
$r_{P_L F_M}$	0,64; 0,8283; 0,8457	0,75; 0,2729; 0,9310
$r_{P_L B M_M}$	0,74; 0,7310; 0,7487	0,46; -0,1219; 0,8066
$r_{B M_L P_M}$	0,68; 0,6693; 0,6904	0,76; 0,3300; 0,9288
$r_{B M_L F_M}$	0,39; 0,3733; 0,4065	0,62; 0,0320; 0,8892
$r_{B M_L B M_M}$	0,71; 0,7001; 0,7196	0,87; 0,6127; 0,9605
$r_{P_M F_M}$	0,88; 0,8755; 0,8843	0,79; 0,3953; 0,9384
$r_{P_M B M_M}$	0,87; 0,8652; 0,8747	0,60; 0,1018; 0,8576
$r_{F_M B M_M}$	0,71; 0,7001; 0,7196	0,57; 0,0277; 0,8531

Tab. A.3: Konfidenzintervalle der Korrelationskoeffizienten für eine Konfidenz mit 95 Prozent

Korrelationskoeffizient	Korrelationskoeffizienten der berechneten Werte; untere Intervallgrenze; obere Intervallgrenze	Korrelationskoeffizienten der historischen Daten; untere Intervallgrenze; obere Intervallgrenze	Differenz zwischen den Korrelationskoeffizienten
r_{P_RSZ}	0,87; 0,8690; 0,8783	0,97; 0,9098; 0,9902	-0,10
r_{F_RSZ}	0,86; 0,8543; 0,8645	0,90; 0,6923; 0,9700	-0,04
r_{BM_RSZ}	0,83; 0,8216; 0,8339	0,73; 0,3478; 0,9042	0,10
r_{P_LSZ}	0,95; 0,9490; 0,9528	0,97; 0,9001; 0,9912	-0,02
r_{BM_LSZ}	0,76; 0,7479; 0,7646	0,58; 0,0091; 0,8657	0,18
r_{P_MSZ}	0,88; 0,8742; 0,8832	0,97; 0,9054; 0,9907	-0,09
r_{F_MSZ}	0,67; 0,6560; 0,6777	0,84; 0,5582; 0,9480	-0,17
r_{BM_MSZ}	0,75; 0,7444; 0,7614	0,54; 0,0132; 0,8322	0,21

Tab. A.4: Korrelationskoeffizienten der Dimensionierungsgrößen inklusive Konfidenzintervalle mit der Stückzahl der berechneten Werte sowie der historischen Daten und deren Differenzen

Dimensionierungsgröße	Wert	Unsicherheit σ
Personal Rohbau P_R	61,44 Mio. €	3,07 Mio. €
Flächen Rohbau F_R	90,00 Mio. €	6,75 Mio. €
Betriebsmittel Rohbau BM_R	50,00 Mio. €	5,00 Mio. €
Personal Lack P_L	40,80 Mio. €	3,06 Mio. €
Betriebsmittel Lack BM_L	100,00 Mio. €	6,00 Mio. €
Personal Montage P_M	108,00 Mio. €	6,48 Mio. €
Flächen Montage F_M	198,00 Mio. €	7,92 Mio. €
Betriebsmittel Montage BM_M	60,00 Mio. €	3,00 Mio. €

Tab. A.5: Werte der Dimensionierungsgrößen und deren Unsicherheit im fiktiven Anwendungsfall