

Entwicklung einer Methode zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

von M.Sc. Hannes Röpke

geb. am 16.01.1989 in Bergen auf Rügen

genehmigt durch die Fakultät Maschinenbau
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Arndt Lüder

Prof. Dr.-Ing. André Katterfeld

Promotionskolloquium am 27.06.201

Ehrenerklärung

„Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die Hilfe eines kommerziellen Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen. Verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass die Dissertation ggf. mit Mitteln der elektronischen Datenverarbeitung auf Plagiate überprüft werden kann.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.“

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation/ Veröffentlichung sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen Aktiengesellschaft.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand bei der Volkswagen AG in Wolfsburg. An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich in jeglicher Form bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Arndt Lüder für die wissenschaftliche Betreuung, die eingeräumten Freiräume sowie wertvollen Anregungen, die diese Arbeit bereichert haben. Weiterhin gilt mein Dank Prof. Dr. Katterfeld für die Übernahme des Koreferates.

Außerdem möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Volkswagen AG für die kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit bedanken. Insbesondere bei meinen Vorgesetzten für die Bereitstellung der notwendigen Ressourcen und die Schaffung der Rahmenbedingungen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meinen Kollegen, welche die erarbeiteten Konzepte mit ihrer Expertise in zahlreichen Gesprächen bereicherten.

Auch möchte ich mich bei allen Studentinnen und Studenten, die ich im Rahmen meiner Tätigkeit bei Volkswagen betreuen durfte und deren Ergebnisse teilweise in diese Arbeit eingeflossen sind, bedanken.

Weiterhin möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden für das entgegengebrachte Verständnis in den letzten Jahren für meine Fokussierung auf diese Dissertation bedanken. Insbesondere danke ich meinen Eltern, die mich auf meinem Weg stets unterstützten sowie förderten. Zuletzt danke ich meiner Frau Kristina für die stetige Ermutigung und Rückenstärkung in allen Phasen dieser Arbeit.

Hannes Röpke

Kurzfassung in Deutsch

Einhergehend mit den volatilen Marktbedingungen für Konsumgüter unterliegen auch die Produktionssysteme, die diese Märkte bedienen, einem stetigen Wandel. Mit der Modifikation dieser Produktionssysteme im Rahmen des Anlagenengineerings gehen Risiken einher, die im Rahmen des Risikomanagements zu beurteilen sowie zu minimieren sind. Die Einführung modularer Produktionssysteme mit wiederverwendbaren Entwurfselemente ermöglicht es, projektübergreifende Synergien durch Skalen- sowie Lernkurveneffekte zu schaffen. Es ist zu untersuchen, wie die Risikobeurteilung für diesen spezifischen Anwendungsfall eines Volumenherstellers in der Automobilindustrie zu gestalten ist.

In diesem Zusammenhang wurde der Planungsprozess bei der Wiederverwendung im Anlagenengineering den damit verbundenen Risiken sowie Risikobeurteilungsmethoden gegenübergestellt und der Handlungsbedarf bzgl. des Einsatzes bestehender Methoden zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung im Anlagenengineering abgeleitet.

Das erarbeitete Methodenkonzept unterstützt den Anwender durch ein quantitatives sowie qualitatives Risikomodell und schafft die Voraussetzungen zur Realisierung der gewünschten Lernkurveneffekte bei der Wiederverwendung für die Risikobeurteilung. Einhergehend mit der gewünschten Steigerung des Reifegrades der Entwurfselemente erhöht sich durch die Methodennutzung auch die Güte der Risikobeurteilungen.

Die untersuchte Fragestellung ist durch ihren Anwendungsbezug charakterisiert. Für die erfolgreiche Validierung des Konzeptes ist somit eine Implementierung in die bestehenden Planungsprozesse erforderlich. Folglich umfasst die Arbeit neben einem Fallbeispiel für die Validierung auch einen Vorschlag zur Integration der Methode in den Planungsprozess, um die Anlaufsituation bei Wiederverwendung von Entwurfselementen zu optimieren.

Diese Arbeit fasst die Erkenntnisse und Strategien des Autors bzgl. der Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering der Automobilindustrie, die während der Tätigkeit als Doktorand gesammelt wurden zusammen. Diese Abhandlung dient folglich als Handlungsleitfaden für eine wiederverwendungsgerechte Risikobeurteilung, stellt jedoch gleichzeitig ein Rahmengerüst, das kontextspezifisch zu adaptieren ist, dar.

Kurzfassung in Englisch (Abstract)

Accompanied by the volatile market conditions for consumer goods, consequently the production systems serving these markets are undergoing a constant change. With the modification of these production systems in the framework of plant engineering, risks are occurring which should be evaluated and consequently minimized in the framework of a risk management. The introduction of modular production systems with re-usable draft elements create cross-project synergies via economies of scale and learning curve effects.

In this context it is to be investigated, how to shape the risk evaluation for this specific use case of a volume manufacturer in the automotive industry. Against this backdrop the planning process for the re-use of plant engineering, the related risks as well as the risk evaluation methodology have been compared and derived the actions required for the use of existing methods for risk evaluation in the re-usage of plant engineering.

The developed methods concept supports the end user with a quantitative and qualitative risk model and creates the preconditions for realization of the desired learning curve effects for the re-usage of risk evaluation. Accompanied with the desired increased level of maturity of the draft elements, the quality of the risk evaluation increases by the methods of use.

The examined question is characterized by its application orientation. For the successful validation of the concept, an implementation in the existing planning processes is necessary. In addition to a case for validation, this thesis incorporates a proposal for the integration of those methods in the planning process, for optimizing the launch situation in case of re-usage of the draft elements.

This thesis summarizes the results and strategies of the author regarding risk evaluation for the re-usage of draft elements in the plant engineering within the automotive industry, which have been gathered during the author's assignment as a doctoral candidate. It simultaneously acts as an action guideline for the appropriately reusable risk evaluation and a framework, which needs context-specific adaptation.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	IV
Kurzfassung in Deutsch	V
Kurzfassung in Englisch (Abstract)	VI
Inhaltsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Forschungsvorgehen.....	5
2 Wiederverwendung im Anlagenengineering.....	8
2.1 Produktionsanlagen in der Automobilindustrie.....	8
2.1.1 Anlagen im Kontext des Produktionssystems	8
2.1.2 Anlagen als mechatronische Einheiten	11
2.1.3 Produktionsstruktur in der Automobilindustrie.....	12
2.2 Wiederverwendung im Produktlebenszyklus von Anlagen	14
2.3 Wiederverwendungsgerechte Produktarchitektur	20
2.4 Wiederverwendungsansätze im Anlagenengineering.....	21
2.5 Wiederverwendung in der Fabrikplanung und Anlagenkonstruktion.....	22
2.5.1 VDI 4499 - Digitale Fabrik	23
2.5.2 VDI 5200 - Fabrikplanung – Planungsvorgehen.....	24
2.5.3 VDI 3695 – Engineering von Anlagen	26
2.5.4 VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte	27
2.5.5 VDI 2422 - Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik.....	29
2.5.6 VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.....	31
2.5.7 Spezifische Wiederverwendungsmethoden	33
2.6 Zusammenfassung der Wiederverwendung im Anlagenengineering.....	35
3 Risiken im Anlagenengineering in der Automobilindustrie	37
3.1 Begriffsdefinition Risiko	37
3.1.1 Informationsorientierte Risikodefinition	38
3.1.2 Entscheidungsorientierte Risikodefinition.....	40
3.1.3 Zielorientierte Risikodefinition	40
3.1.4 Risikodefinition im Kontext des Anlagenengineerings.....	42
3.2 Risikoklassifizierung im Anlagenengineering.....	43
3.3 Zusammenfassung	48

4	Risikomanagement im Anlagenengineering	50
4.1	Risikomanagementprozess	50
4.2	Risikoidentifikation	52
4.3	Risikoanalyse	54
4.4	Risikobewertung	55
4.5	Risikosteuerung	62
4.6	Risikomanagementdokumentation und Risikoreporting	62
4.7	Risikoüberwachung	63
4.8	Wiederverwendung von Risikobeurteilungen	64
4.9	Zusammenfassung	65
5	Forschungslücken Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung	67
5.1	Methodenauswahl für die Risikobewertung im Anlagenengineering	68
5.1.1	Projektrisiken	68
5.1.2	Monte-Carlo-Simulation	70
5.1.3	Baye'sche Netze	72
5.1.4	Prozess- und Produktrisiken	73
5.1.5	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse	74
5.2	Potentiale für die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen	76
5.2.1	Potentiale der Risikobewertung bei der Wiederverwendung	77
5.2.2	Potentiale der Risikoanalyse bei der Wiederverwendung	79
5.2.3	Potentiale der Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung	80
5.2.4	Struktur als Voraussetzung zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung	82
5.3	Zusammenfassung der Forschungsfragen	82
6	Voraussetzungen für die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung	85
6.1	Anlagenstruktur	86
6.2	Informationen für die Risikobeurteilung	91
7	Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen	93
7.1	Methodik Delta-Engineering	94
7.1.1	Informationsmodellierung Delta-Engineering	95
7.1.2	Bibliothekgestützte Risikoidentifizierung	97
7.2	Delta-Engineering-Umwelt	99
7.2.1	Ablauf- und Aufbauorganisation Delta-Engineering-Umwelt	99
7.2.2	Konzipierung Fragenkatalog	101
7.3	Delta-Engineering-Produkt	103
7.3.1	Ablauf- und Aufbauorganisation Delta-Engineering-Produkt	104
7.3.2	Konzipierung Fragenkatalog Delta-Engineering-Produkt	104
7.4	Kennzahlen zur Beurteilung von Projektrisiken	106
7.4.1	Allgemeine Projektrisikokennzahlen	107
7.4.2	Globale Projektrisikokennzahlen	108
7.4.3	Lokale Projektrisikokennzahlen	111
8	Risikoanalyse bei der Wiederverwendung von Entwurfselement	113

8.1	Global	113
8.2	Lokal	117
9	Risikobewertung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen.....	120
9.1	Risikobewertung von Fertigungsprozessen im Anlagenengineering	120
9.2	Risikobewertung des Projekts im Anlagenengineering	124
10	Integration der Risikobeurteilung in den Planungsprozess	126
10.1	Modellstruktur	126
10.2	Prozessentwurf Risikobeurteilung	127
10.3	Mikrozyklus Risikomanagement bei der Wiederverwendung.....	129
10.4	Makrozyklus Risikomanagement bei der Wiederverwendung	132
11	Methodenanwendung in der Montageplanung	135
11.1	Fallbeispiel Dachsystem-Verbau	135
11.2	Risikoidentifikation	139
11.2.1	Bibliothekgestützte Risikoidentifizierung	139
11.2.2	Delta Engineering Produkt	140
11.2.3	Delta-Engineering Standort.....	142
11.3	Risikoanalyse bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen	143
11.3.1	Globale Projektrisiko Risikoanalyse	144
11.3.2	Lokale Projektrisikobewertung	144
11.4	Risikobewertung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen	145
11.4.1	Risikobewertung von Fertigungsprozessen	145
11.4.2	Risikobewertung von Fertigungsprozessen im Anlagenengineering	146
12	Zusammenfassung und Ausblick	148
	Literaturverzeichnis	153
A.	Anhang Struktur Einbau-Dachsystem-Anlage.....	XV
B.	Anhang: Allgemeine Projektkennzahlen A_i - Fallbeispiel.....	XVI
C.	Anhang: Globale Projektkennzahlen B_i - Fallbeispiel	XVII
D.	Anhang: Lokale Projektkennzahlen C_i - Fallbeispiel	XVIII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2: Strukturierung Grundlagen Wiederverwendung im Engineering.....	8
Abbildung 3: Kausalität zwischen Produkt, Prozess, Ressource und Engineering (Pfrommer et al. 2013, S. 3)	11
Abbildung 4: Grundstruktur einer mechatronischen Einheit (VDI 2206, S. 14).....	12
Abbildung 5: Integrierter Produktlebenszyklus (Herrmann 2010, S. 72) (Horneber 1995)	15
Abbildung 6: Betriebsphasen im Lebenszyklus von Produktionssystemen (Wiendahl et al. 2002, S. 651)	17
Abbildung 7: Verknüpfung von Produktlebenszyklen/ Wiederverwendung (Lüder et al. 2017b)	19
Abbildung 8: Planungsprozess für Fertigungsanlagen (VDI 4499-2, S. 10)	23
Abbildung 9: Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses (VDI 5200-1, S. 8)	24
Abbildung 10: Wiederverwendung von Artefakten (VDI/VDE 3695-2, S. 4)	27
Abbildung 11: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren.....	28
Abbildung 12: Vorgehensplan für die Entwicklung von Geräten mit Steuerung durch Mikroelektronik (VDI/VDE 2422, S. 15)	30
Abbildung 13: Iteratives Vorgehen beim Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse (VDI 2206, S. 44).....	32
Abbildung 14: Planungsprozess zur Wiederverwendung von Anlagenartefakten (Döbele 2009, S. 424)	34
Abbildung 15: Wiederverwendung von physischen und informativen Artefakten im Produktionssystemzyklus (Lüder et al. 2017b, S. 127).....	36
Abbildung 16: Risiko im engeren / weiteren Sinn (Wöhe und Döring 2002, S. 122).....	39
Abbildung 17: Herleitung Risikodefinition	42
Abbildung 18: Risikogruppen eines Unternehmens (Wolke 2008) (Keitsch 2004) (Wittmann 2006) (Wiedemann 1998) (Romeike 2003c)	45
Abbildung 19: Risikomodell im Anlagenengineering (Gutmannsthal-Krizanits 1994, S. 248).....	47
Abbildung 20: Risiken im Anlagenengineering	49
Abbildung 21: Risikomanagementprozess Risikomanagementprozess (DIN ISO 31000, S. 22).....	51
Abbildung 22: Klassifizierung der Datenerhebungstechniken (Jodin und Mayer 2004, S. 4).....	53
Abbildung 23: Risikomatrix (VDA 4-2, S. 65).....	58
Abbildung 24: Risikomanagement im Anlagenengineering	66
Abbildung 25: Ableitung der Forschungsfragen	67
Abbildung 26: Vorgehen Methodenauswahl.....	68
Abbildung 27: Methodenauswahl Projektrisiken.....	70
Abbildung 28: Methodenauswahl Produkt- und Prozessrisiken.....	74
Abbildung 29: Vorgehensmodell zur Durchführung einer FMEA (VDA 4-2, S. 17).....	76
Abbildung 30: Analyse dynamisches Projektrisiko	79

Abbildung 31: Handlungsbedarf für die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering	83
Abbildung 32: Einordnung des Kapitels 6 in den Forschungskontext.....	85
Abbildung 33: Verknüpfung der Ressourcenstruktur eines Produktionssystems mit Produkt- und Prozessqualität (Lüder et al. 2017b, S. 122).....	87
Abbildung 34: Verknüpfung der Produkt-, Prozess- sowie Projektrisiken am Beispiel einer Klebedüse	92
Abbildung 35: Einordnung des Kapitels 7 in den Forschungskontext.....	93
Abbildung 36: Deltaengineering	94
Abbildung 37: Informationsmodellierung Delta-Engineering.....	95
Abbildung 38: Bibliotheksstruktur Montageprozessbausteine	96
Abbildung 39: Struktur Montageprozessbaustein	97
Abbildung 40: Modellierung des Cockpitbaus mit Montageprozessbausteinen	98
Abbildung 41: Exemplarischer Ablauf Delta-Engineering-Umwelt-Workshop.....	100
Abbildung 42: Exemplarischer Aufbauorganisation Delta-Engineering-Umwelt	101
Abbildung 43: Ablauf Konzipierung Fragenkatalog	102
Abbildung 44: Herleitung Fragenkatalog am Beispiel eines Sauggreifers.....	102
Abbildung 45: Struktur Fragenkatalog	103
Abbildung 46: Erstellung projektspezifischer Fragenkatalog	103
Abbildung 47: Ablauf Konzipierung Checkliste - Montage.....	104
Abbildung 48: Verknüpfung Arbeitseinheiten mit Montagefunktionen (Strathmann 2016, S. 52).....	105
Abbildung 49: Herleitung der Cluster Produktmerkmale am Beispiel Applizieren (Strathmann 2016, S. 65)	105
Abbildung 50: Delta-Engineering-Produkt am Beispiel Einbau des Frontends.....	106
Abbildung 51: Ursachen technischer Projektrisiken im Anlagenbau	108
Abbildung 52: Fehlerbeeinflussung im Produktlebenszyklus Fehlerbeeinflussung im Produktlebenszyklus (VDA 14, S. 11).....	112
Abbildung 53: Einordnung des Kapitels 8 in den Forschungskontext.....	113
Abbildung 54: Histogramm Monte-Carlo-Simulation für PR1-K mit der Software Crystall Ball (Oracle).....	117
Abbildung 55: Struktur Bayes'scher Netze für die lokale Risikoanalyse.....	118
Abbildung 56: Visualisierung lokales Projektrisiko mit der Software Geni (BayesFusion)	119
Abbildung 57: Einordnung des Kapitels 9 in den Forschungskontext.....	120
Abbildung 58: Vorgehensmodell Ableitung Risikokubus	121
Abbildung 59: Ermittlung RPZK.....	122
Abbildung 60: Ableitung der Grenzwerte für die Risikoklassen	123
Abbildung 61: Startiteration Risikokubus (A/B-Matrizen).....	123
Abbildung 62: Histogramm Projektgesamtrisiko PGR-K.....	124
Abbildung 63: Sensitivität Projektgesamtrisiko PGR-K	125
Abbildung 64: PR3-K eines kritischen Projektumfangs	125
Abbildung 65: Beurteilung der Projektrisiken während der Anlagenentstehung	127
Abbildung 66: SIPOC-Analyse Delta-Engineering-Umwelt (Crezelius 2015)	128

Abbildung 67: Flussdiagramm mit RASCI Systematik Delta-Engineering-Umwelt	129
Abbildung 68: Mikrozyklus Risikomanagement (i.e.S.).....	130
Abbildung 69: Exemplarischer Risikobericht eines Fertigungsprozesses	131
Abbildung 70: Makrozyklus Risikomanagement.....	134
Abbildung 71: Montageprozess geklebter Dachsysteme.....	137
Abbildung 72: Ressource geklebtes Dachsystem	137
Abbildung 73: Bibliothekgestützte Montageprozess-Modellierung	139
Abbildung 74: Funktions- und Fehlfunktionsverknüpfung der Montageprozessbausteine	140
Abbildung 75: Checkliste Delta-Engineering-Produkt geklebtes Dachsystem (Strathmann 2016).....	141
Abbildung 76: Gesamtprojektrisiko geklebtes Dachsystem (Oracle)	144
Abbildung 77: Projektrisiko Teileträger (BayesFusion).....	145
Abbildung 78: Risikokubus A zu E	146
Abbildung 79: Sensitivität Globales Projektgesamtrisiko PGR-K (Oracle).....	147
Abbildung 80: Lokales Projektrisiko durch Behälter – Zeitvariante Visualisierung	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wiederverwendungsansätze- und Mechanismen (Schröck 2016, S. 21)	22
Tabelle 2: Zielzustände der Wiederverwendung (VDI 3695 - Blatt 3).....	27
Tabelle 3: Methodencluster zur Risikoidentifizierung (Voigt 2010) (VDA 4-2) (Romeike 2003c) (Alfen et al. 2010) (Huth und Romeike 2016) (Königs 2013) (Romeike 2018).....	54
Tabelle 4: Methodenübersicht Risikobeurteilung (ISO 31000, S. 22) (Voigt 2010) (Piaz 2002) (Neudörfer 2013; Königs 2013) (Alfen et al. 2010) (Denk und Exner-Merkelt 2005) (Königs 2013) (Arbatschat 2016) (Voigt 2010) (VDA 14)	60
Tabelle 5: Interpretation von Risikoprioritätszahl-Werten (Linß 2005, S. 411)	78
Tabelle 6: Allgemeine Projektkennzahlen (Arbatschat 2016)	108
Tabelle 7: Exemplarischer Bewertungskatalog für Merkmalsausprägung (VDA 4-2, S. 119).....	109
Tabelle 8: Globale Risikokennzahlen B_i mit exemplarischen Kennzahlwerten (Arbatschat 2016).....	110
Tabelle 9: Lokale Risikokennzahlen C_i (Arbatschat 2016)	111
Tabelle 10: Absoluter Vergleich der Merkmalsträger des Projektrisikos PR1-K.....	114
Tabelle 11: Normierter Vergleich der Merkmalsträger des Projektrisikos PR1-K	114
Tabelle 12: Exemplarische Risikointensitätsskala	115
Tabelle 13: Relative Eckpunkte der Dreiecksverteilung PR1-K.....	116
Tabelle 14: Erwartungswert lokales Projektrisikos	118
Tabelle 15: Risikoklassen.....	122
Tabelle 16: Projektrisiken-Erwartungswert Fallbeispiel geklebtes Dachsystem	145

Abkürzungsverzeichnis

ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
EG	Europäische Gemeinschaft
EHB	Elektrohängebahn
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse
IBN	Inbetriebnahme
LH	Lastenheft
MPB	Modularer Produktionsbaukasten
MQB	Modularer Querbaukasten
n.i.O.	Nicht in Ordnung
OEM	Original Equipment Manufacturer
PAAG	Prognose, Auffinden, Abschätzen, Gegenmaßnahmen
PPR	Produkt-, Prozess-, Ressource
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
RASCI	Responsible, Approval, Support, Consulted, Informed
RPS	Referenz-Punkt-System
RPZ	Risikoprioritätszahl
SIPOC	Supplier, Input, Process, Output sowie Customer
SWIFT	Structured What If Technique
WS	Workshop
VFF	Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge

1 Einleitung

Das Eingangskapitel dient der Darstellung der Motivation, des Bedarfs sowie der Vorgehensweise dieser Dissertation. Hierfür werden die aktuellen Herausforderungen sowie deren Folgen für produzierende Unternehmen charakterisiert. Auf dieser Basis erfolgt anschließend die Ableitung der Zielstellung und der allgemeinen Forschungsfragen. Das Kapitel endet mit der Erläuterung der Forschungsmethodik zur Beantwortung der Forschungsfragen sowie der Vorstellung der damit induzierten Dissertationsstruktur.

1.1 Motivation

Der ökonomische Erfolg international produzierender Unternehmen bedingt eine effiziente Wertschöpfung unter den gegebenen technischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen (Lüder et al. 2011) (Fischäder 2007) (Dannenbergh 2005). Mit dem zunehmenden Agieren auf Verdrängungsmärkten ergeben sich Herausforderungen für Produktionssysteme. Sowohl im Wettbewerb um Marktanteile als auch für höhere Erlöse versuchen die Hersteller einen zusätzlichen Kundennutzen durch eine zunehmende Derivatisierung der Modellplatten sowie eine Individualisierung der Produkte zu generieren (Wiendahl et al. 2014) (Kamiske und Brauer 2011) (Reichwald und Piller 2009) (Porter 1980). Infolge der sich schnell ändernden Kundenwünsche steigt die Frequenz der Vorstellung neuer Produkte. Resultierend aus den kurzen Produktlebenszyklen häufen sich die Anläufe eines Produktionssystems, bei einer simultanen Steigerung der Anforderungen an dieses, infolge der kurzen Amortisationszeiten der Produkte (Nagel 2011).

Weiterhin erfordert eine fortlaufend wirtschaftliche Produktion u.a. auch die Integration technologischer Fortschritte im Bereich der Fertigungsverfahren, wie z.B. Verfahren der additiven Fertigung aus dem Bereich der Hochtechnologien. Neue Technologien, wie z.B. die zunehmend intelligente Verknüpfung der Marktanforderungen mit der Shopfloor-Ebene im Rahmen von Big-Data, geben Lösungen für das volatile Umfeld vor (VDI/VDE 2015) (Bracht et al. 2011). Folglich sind das fortlaufende Technologie-Scouting und die ggf. anschließende Technologieintegration im Wettbewerb um möglichst effiziente Fabriken unabdingbar. Auch wenn diese Technologien Antworten auf die Rahmenbedingungen der agierenden Unternehmen bieten, so sind diese häufig komplex, investitionsintensiv (Möller und Stirzel 2008) und aus technischer Sicht fehleranfällig (Kuhn 2002) (Wiendahl 2010).

Die zunehmende Komplexität der Fertigungsanläufe äußert sich häufig in der Verfehlung von technischen und wirtschaftlichen Zielen (Fitzek 2006) (Bischoff 2007) (Wiendahl et

al. 2002). Zur Lösung dieser Herausforderungen werden verschiedene Ansätze entlang des Produktlebenszyklus von Produktionssystemen verfolgt. Einerseits ist es möglich, die Entwicklungszeiten für Anlagen, die Engineering-Phase (vgl. Kap. 2.2), z.B. durch die Parallelisierung von Produktentwicklung und Produktionsplanung im Rahmen des Concurrent bzw. Simultaneous Engineering oder eines beschleunigten Datenaustauschs (Bracht et al. 2011) (Drath 2010), zu minimieren (Wildemann 2008) (Pfeifer und Schmitt 2008). Andererseits kann auch durch ein intelligentes Engineering die Produktnutzungszeit (engl. use phase) im Rahmen modularer, rekonfigurierbarer und flexibler Anlagen verlängert werden. In diesem Zusammenhang führen viele Hersteller Modularisierungs- bzw. Baukastenstrategien für Produkte und Produktionssysteme zur Beherrschung der Variantenvielfalt sowie zur Verringerung der Entwicklungskosten ein. Exemplarisch sei an dieser Stelle auf den „Modularen Produktionsbaukasten“ (MPB) der Volkswagen AG oder auch den „Industriebaukasten“ der Daimler AG verwiesen (Walzl und Wildemann 2015). Neben dem Potential, Anlagen über möglichst viele Produktlebenszyklen zu nutzen, können konstruktionsgleiche bzw. -ähnliche Anlagen auch an verschiedenen Standorten unterschiedliche Produkte bauen, was die Engineeringkosten, durch die mehrmalige Nutzung bereits während des Engineerings entworfener Elemente, der Entwurfselemente, reduziert. Mit der Standardisierung sowie Modularisierung sind darüber hinaus Lernkurveneffekte, die produktlebenszyklusübergreifend genutzt werden können, verbunden.

Die Planung und Realisierung von Produktionssystemen erfolgt i.d.R. in Firmenkooperationen. Für die Effizienzsteigerung und Anlaufzielerreichung muss folglich die gesamte Wertschöpfungskette analysiert werden. Das Engineering erfolgt dabei in einer Kombination verschiedenster Tätigkeiten der Handelspartner in teilweise divergierenden Produktlebenszyklen. Ein Ansatz zur Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus von Produkt sowie Produktionssystem ist die Industrie 4.0-Initiative, die Methoden, Werkzeuge und Systeme zum Umgang mit der gegebenen Komplexität vorschlägt (VDI/VDE 2015) (Vogel-Heuser et al. 2017b). Um den steigenden und sich ändernden Anforderungen an das Produktionssystem zukünftig Rechnung zu tragen, werden diese intelligenter und durch die in Bibliotheken strukturierten konfigurierbaren einzelnen Elemente, die projektübergreifend genutzt werden, flexibler (Heinen et al. 2008) (Döbele 2009). Das Anlagenengineering hat somit einen evolutionären Charakter, was sich durch die inkrementelle Anpassung einzelner Anlagenelemente an die divergierenden Bedingungen bei Beibehaltung der wesentlichen Anlagenstruktur und -eigenschaften äußert.

Aufgabe der Fertigungsplanung ist es, diese Lösungen im Rahmen des Engineerings sowie des Anlaufes umzusetzen und weiterzuentwickeln, um den ökonomischen Erfolg des Unternehmens sicherzustellen. Die Realisierung der Potentiale bibliotheksbasierender inkrementeller Ansätze, wie z.B. der MPB-Strategie, zur Integration neuer Technologien in bestehende Produktionssysteme, erfordert eine entsprechende Ausrichtung der Planungsmethoden. Folglich ist der Einsatz konventioneller Planungsmethoden zu hinterfragen (Vogel-Heuser et al. 2017a) (Meling 2013) (Hell 2018) (Schmidt 2018).

Zur Überprüfung bestehender Planungsmethoden eignen sich insbesondere deduktive Forschungsansätze (Seiffert 2003). Den Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit bildet das Volumensegment der Automobilindustrie, deren Rahmenbedingungen kongruent zu den zuvor beschriebenen sind (Göpfert et al. 2017), (Kropik 2009) (Walzl und Wildemann 2015). Im Fokus steht insbesondere die automobiler Endmontage, die aktuell durch eine Vielzahl technologischer Neuerungen, wie z.B. agentenbasierte Steuerungen intelligenter Produktionssysteme, geprägt ist (Lüder et al. 2018) (Vogel-Heuser et al. 2017a). Induktive Rückschlüsse auf andere Anwendungsfälle sind folglich individuell zu überprüfen. In der Automobilindustrie entspricht die modulare Gestaltung von Produktionssystemen zur Wiederverwendung dem Stand der Technik (Walzl und Wildemann 2015), (Schuh 2012). Verschiedenste Forschungsansätze untersuchen die Anpassung der Aufbau- und Ablauforganisation zur Realisierung der mit der Wiederverwendung verbundenen Potentiale. In diesem Zusammenhang ergeben sich Forschungsfragen hinsichtlich der Datenverknüpfung von Planungsmethoden, -prozessen sowie -werkzeugen entsprechend der Industrie 4.0-Initiative (Vogel-Heuser et al. 2017a).

In Bezug auf die steigende Anzahl von Integrationsprojekten und deren Komplexität stellt sich die Frage, wie das Risikomanagement zur Realisierung der Anlaufziele am effizientesten gestaltet wird. Im klassischen Simultaneous Engineering für Produktneuentwicklungen ist eine möglichst präventive Fehlervermeidungsstrategie in der Produktentstehung anzustreben, da die Fehlerbehebungskosten exponentiell steigen (Pfeifer und Schmitt 2008) (Burghardt 2012). In diesem Zusammenhang ist zu überprüfen, ob die bestehenden Risikomanagementmethoden auch auf die Modifizierung der Einsatzbedingungen bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen ausgerichtet sind. Intention ist es, nicht nur den Konstruktionsaufwand durch die Wiederverwendung von Elementen zu reduzieren, sondern auch die Aufwendungen für das Risikomanagement. Weiterhin werden die Risikofolgen primär für das Produkt sowie den

Fertigungsprozess beurteilt und die Auswirkungen für das Projekt zumeist nicht explizit kosten- und zeitbezogen sowie unternehmensübergreifend betrachtet (Hempel und Offerhaus 2008), (Arbatschat 2016). Zusammenfassend ist für das Risikomanagement bei der Wiederverwendung von Elementen zu hinterfragen, ob der nicht unerhebliche Aufwand reduziert werden kann sowie die Betrachtung im Fahrzeugprojekt ganzheitlich für die Priorisierung der Risikomanagementaktivitäten möglich ist.

1.2 Zielsetzung

Im vorherigen Kapitel hat eine Darstellung der Ausgangssituation für die Bearbeitung des Risikomanagements bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Rahmen dieser Arbeit stattgefunden. Es wurde herausgearbeitet, dass bestehende Planungsmethoden verstärkt auf die Neuentwicklung von Produkten und nicht auf die Nutzung von modularen Baukästen bei der Produktentwicklung ausgerichtet sind. Basierend auf dieser Eruierung ist es das Ziel dieser Arbeit, einen Beitrag zur Verbesserung der Risikobeurteilung bei der modularen Produktionssystemgestaltung zu leisten, um Risikomanagementaktivitäten zur Verbesserung der Anlaufsituation effizient einsteuern zu können. Die gezielte Einsteuerung von Risiken fordert eine transparente Kommunikation der Risiken, welche auf einer objektiven Identifizierung, Analyse und Bewertung entlang der Wertschöpfungskette des Engineerings fußt. Entsprechend leitet sich das Ziel ab, eine Methode, die eine Beurteilung der Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering erlaubt, zu entwickeln. Hieraus ergibt sich folgende übergeordnete Forschungsfrage.

Wie können die Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering beurteilt werden, um aufgrund von Prognosen Projektentscheidungen zu treffen?

In diesem Zusammenhang stellt sich eingangs die Frage nach der Risikoidentifizierung und anschließend nach deren Bewertung.

Wie können die potentiellen Risiken bei der Wiederverwendung von Produktionssystemen im Engineering-Prozess frühzeitig erfasst und analysiert werden?

Wie können die Risiken projektbezogen bewertet werden, um Aussagen zur aktuellen Risikoposition sowie der getroffenen Maßnahmen zu treffen?

Zur Beantwortung dieser Fragen wird im Folgenden eine Methode entwickelt, die durch ihre Vorgehensweise eine systematische Risikoidentifikation, -analyse und -bewertung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering erlaubt.

1.3 Forschungsvorgehen

Nach der Darstellung des Forschungsbedarfs gilt es nun die Vorgehensweise für die Bearbeitung der Problemstellung zu erläutern. Die vorliegende Arbeit ist in die angewandte Forschung einzuordnen. Intention ist die Beschreibung einer generischen Lösung für das in Kapitel 1.2 charakterisierte Problem. Der Aufbau der Arbeit orientiert sich am Vorgehen für angewandte Wissenschaft (Ulrich et al. 1984) (vgl. Abbildung 1).

Das Vorgehen beginnt und endet in der Praxis. Der Forschungsprozess ist iterativ zu verstehen, sodass die letzte Phase nicht das Ende des Forschungsprozesses darstellt. Entsprechend des handlungstheoretischen Forschungskonzepts korreliert die theoretische Bedeutung mit der erfolgreichen Realisierung. Die Aktionsforschung setzt eine Evaluierung der Ergebnisse in der Praxis voraus. Der Praxisbezug findet sich insbesondere in den Phasen, 1, 2, 4, 5 sowie 11 wieder.

Das erste Kapitel schildert die Motivation dieser Arbeit, Produktionssysteme zukünftig verstärkt zu modularisieren und über mehrere Produktionslebenszyklen zu nutzen, was die Komplexität der Anläufe erhöht. Es bestehen Potentiale für die Risikobewertung modularer Produktionssysteme, die es im Rahmen dieser Arbeit zu realisieren gilt. Das Kapitel endet mit der Ableitung der Forschungsfragen sowie der Erläuterung des Forschungsvorgehens.

Die zwei nachfolgenden Kapitel bilden den Bezugsrahmen dieser Abhandlung. Es erfolgt eine Charakterisierung des Anlagenengineerings in der Automobilindustrie sowie des Risikobegriffs. Aufbauend auf den Ergebnissen wird eine Klassifizierung der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Risiken im Anlagenengineering vorgenommen. In diesem Zusammenhang dienen die Grundlagenkapitel der geforderten Untersuchung des Anwendungszusammenhangs (Ulrich et al. 1984), um den Problembereich zu konkretisieren sowie die Zielsetzung der Arbeit sukzessiv zu spezifizieren.

Im vierten Kapitel erfolgt eine detaillierte Betrachtung des Risikomanagements. Dieses Kapitel dient zur Erfassung der problemrelevanten Theorien der Grundlagen und Formalwissenschaften (Ulrich et al. 1984), um erste Lösungsansätze zu generieren. Hierfür werden einerseits der Risikomanagementprozess analysiert sowie evaluiert und andererseits die Methoden zur Risikobeurteilung klassifiziert.



Abbildung 1: Aufbau der Arbeit

Die Konkretisierung der Forschungsfragen in Kapitel fünf erfolgt auf Basis des Abgleichs der Forschungsfragen mit den gewonnenen Erkenntnissen aus der Analyse des Stands der Technik der vorherigen Kapitel. Eingangs erfordert dies eine theoriegeleitete Erfassung der Anforderungen an die Risikomethode zur Methodenvorauswahl. Auf Basis der bestehenden Methoden wird eine erste Grobkonzipierung der Risikobeurteilung vorgenommen. Abschließend ergibt sich auf Grundlage der identifizierten Differenzen der Methoden in Bezug auf die Forschungsfrage eine Detaillierung des Handlungsbedarfs.

Zur Lösung der anfänglichen Forschungsfragen erfolgt von Kapitel sechs bis Kapitel neun die praktische Ausgestaltung der Methoden unter Beachtung der Erkenntnisse bzgl. der

Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering, des Risikomanagements sowie des definierten Handlungsbedarfs. Resultierend wird das Gesamtkonzept in Kapitel zehn erläutert. In diesem Zusammenhang erfolgt eine Prozessbeschreibung der Teilschritte des Risikomanagements im Kontext des Anlagenengineerings.

Im anschließenden Kapitel elf erfolgt die Evaluierung der Methode anhand ausgewählter Fallbeispiele aus der Montage eines Automobilproduzenten. Grundlage der Evaluierung bilden die zuvor in Kapitel fünf definierten Forschungslücken. Auf Basis der konsolidierten Ergebnisse dieser Fallbeispiele wird eine Handlungsempfehlung abgeleitet.

Mit der Beantwortung der Forschungsfrage, der kritischen Würdigung der methodischen Vorgehensweise sowie einem Ausblick auf resultierende weitere Forschungsfragen in Kapitel zwölf endet diese Arbeit.

2 Wiederverwendung im Anlagenengineering

Im Folgenden werden mit der Charakterisierung der ablauf- sowie aufbauorganisatorischen Struktur bzgl. der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering die Grundlagen (vgl. Abbildung 2) für die Ableitung der damit verbundenen Risiken geschaffen (vgl. Kap. 3). Zu diesem Zweck wird zunächst der Betrachtungsgegenstand Produktionsanlage näher erläutert. Anschließend erfolgen Analysen der Wiederverwendung in Bezug auf den Produktlebenszyklus, die Produktstruktur sowie bestehende Mechanismen im Anlagenengineering. Mit der abschließenden Betrachtung geltender Fabrikplanungs- sowie Engineeringmethoden hinsichtlich der Wiederverwendung von Entwurfselementen in der Automobilindustrie endet dieses Kapitel.

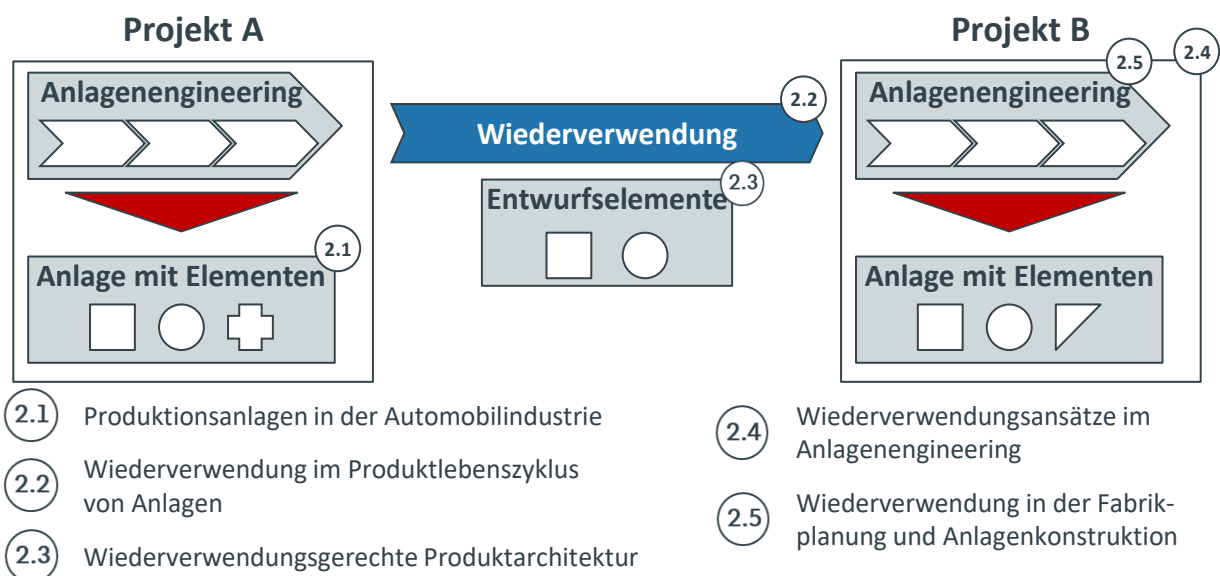


Abbildung 2: Strukturierung Grundlagen Wiederverwendung im Engineering

2.1 Produktionsanlagen in der Automobilindustrie

Zunächst wird ein Exzerpt über die aufbau- und ablauforganisatorischen Zusammenhänge von Produktionssystemen in der Automobilindustrie gegeben. Eingangs erfordert dies eine Charakterisierung des Produktionssystems und seiner Elemente. Darauf aufbauend erfolgen die Spezifizierung des Betrachtungsgegenstands Anlage sowie die Vorstellung verschiedener Strukturierungsansätze.

2.1.1 Anlagen im Kontext des Produktionssystems

Die Charakterisierung komplexer Systeme erfolgt häufig mithilfe der Systemtheorie nach funktionalen, strukturellen sowie hierarchischen Aspekten (Ropohl 2009). Ein System ist eine „Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente, die in einem bestimmten Zusammenhang als Ganzes gesehen und als von ihrer Umgebung abgegrenzt betrachtet

werden“ (DIN IEC 60050-351, S. 21). Ein System wird i.d.R. entsprechend seiner Zielsetzung definiert (DIN IEC 60050-351). Ein System besteht aus verschiedenen Elementen, die bestimmte Eigenschaften besitzen und heterogen sind. Die Struktur des Systems ergibt sich aus Beziehungen zwischen den Elementen (Haberfellner und Daenzer 2002). Diese Beziehungen besitzen Eigenschaften. Ein System besitzt Eigenschaften, die sich aus der Struktur des Systems ergeben und nicht auf einzelne Elemente zurückgeführt werden können. Die horizontale Struktur, auch als Ablaufstruktur bezeichnet, bildet die Flussrelation durch Material-, Informations- und Stofffluss zwischen den Systemelementen ab (Westkämper und Zahn 2009). Für Analysen der Eingabe- und Ausgabe-Beziehung des Systems wird häufig auf das Black-Box-Prinzip zurückgegriffen. Hierbei werden lediglich Input sowie Output erfasst (Müller et al. 2013). Hingegen ergibt sich die horizontale Struktur, die Aufbaustruktur, des Systems durch die Zugehörigkeit einzelner Elemente zu einer definierten Menge von Elementen auf Basis spezifischer Eigenschaften. Die hierarchischen Ebenen der vertikalen Struktur werden durch die Untergliederung von Systemen nullter Ordnung in Systeme höherer Ordnung gebildet. Teilsysteme ergeben sich durch die Knüpfung anderer Beziehungsformen zwischen den Subsystemen (Westkämper und Zahn 2009).

Die Abgrenzung eines Produktionssystems zu anderen soziotechnischen Systemen erfolgt durch „eine technisch, organisatorisch und kostenrechnerisch selbstständige Allokation von Potential- und Mittelfaktoren zu Produktionszwecken“ (Eversheim 1992, S. 4). Dabei ist die Produktion im Allgemeinen durch den „Einsatz und die Kombination von materiellen und immateriellen Gütern zur Herstellung und Verwertung anderer Güter“ charakterisiert (Eversheim 1992). Die Elemente eines Produktionssystems umfassen ein Produkt sowie Ressourcen, die durch horizontale Beziehungen, die Prozesse, miteinander verbunden sind und einer hierarchischen Ordnung, durch die Eigenschaften der Elemente, unterliegen. In diesem Kontext wird zur Darstellung des Produktionssystems häufig auf das Ressourcen-Produkt-Prozess-Konzept zurückgegriffen, das im Folgenden vorgestellt wird (DIN EN 62264-1) (Schleipen 2013).

Der Prozess ist ein „Satz zusammenhängender oder sich gegenseitig beeinflussender Tätigkeiten, der Eingaben zum Erzielen eines vorgesehenen Ergebnisses verwendet“ (DIN EN ISO 9000, S. 39). Der Prozess ist „die Gesamtheit von aufeinander wirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert werden“ (DIN IEC 60050-351, S. 32). In Bezug auf den technischen Prozess umfasst dieser die Gesamtheit der Vorgänge in einer technischen

Anlage. Der Prozess kann sich aus mehreren Unter- bzw. Teilprozessen zusammensetzen (DIN IEC 60050-351).

Während früher gemäß DIN 6789 Produkte als „in sich geschlossene, aus einer Anzahl von Gruppen und/oder Teilen bestehende funktionsfähige Gegenstände (z.B. Maschinen, Geräte) als Fertigungs-Endergebnisse“ (DIN 6789-6) (Schleipen 2013, S. 230) definiert sind, wird das Produkt im Folgenden als „ein Ergebnis eines Prozesses“ (DIN EN ISO 9000, S. 43) definiert. Folglich subsumiert das Produkt nicht nur das Endergebnis der gesamten Produktion, sondern auch das Ergebnis einzelner Produktionsschritte, wie z.B. ein fertiggestelltes Seitenteil. Die Art der Veränderung wird durch die Ablaufbeschreibung definiert (DIN EN 62264-1). Dienstleistungen, die auch Ergebnisse eines Prozesses sind, werden im Folgenden nicht weiter betrachtet (DIN EN ISO 9000).

Die Ressourcen subsumieren alle Mittel, die zur Realisierung des Prozesses erforderlich sind, jedoch nicht die Ein- und Ausgaben (Arbeitsgegenstand und Produkt) in das System. Die Produkte werden somit auf Ressourcen, die Fähigkeiten für den Prozess bereitstellen, gefertigt (DIN EN 62264-1). Die Ausführung von Prozessen zur Fertigung von Produkten bedingt somit den Ressourceneinsatz, wie z.B. Personal oder auch Ausrüstung.

Im Kontext des Fertigungsprozesses realisiert der Prozess das Fertigungsverfahren (DIN 8580) unter Nutzung der Produktionsfähigkeit von Ressourcen (DIN EN 62264-1). Die Kausalität zwischen Elementen innerhalb eines Produktionssystems ist aus Prozess-, Ressourcen- und Produktsicht formulierbar. In Abbildung 3 sind exemplarisch die Relationen der Elemente im Produkt-, Prozess-, Ressource-Modell (PPR-Modell) miteinander veranschaulicht.

Zusammenfassend bezeichnet ein Produktionssystem ein soziotechnisches System, das Input in wertschöpfenden (z.B. Material) und assoziierten Prozessen (z.B. Transport) zu Output (z.B. Produkt) transformiert (Heinen et al. 2008). Intention des Produktionssystems ist die Herstellung eines End- bzw. Zwischenprodukts durch zugeordnete technische Ressourcen und den Menschen. Methoden determinieren den inneren Aufbau des Produktionssystems sowohl hinsichtlich horizontaler Struktur bzw. Ablauforganisation als auch vertikaler Struktur bzw. Aufbaustruktur. Folglich resultiert das Produktionssystem aus dem Zusammenwirken von Organisation, Ressourcen, Menschen und Methoden (Cisek et al. 2002).

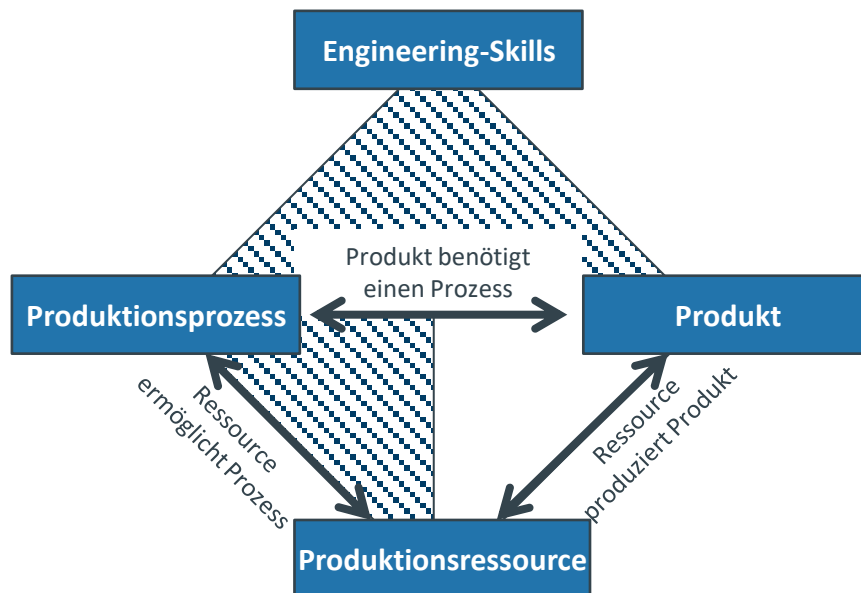


Abbildung 3: Kausalität zwischen Produkt, Prozess, Ressource und Engineering (Pfrommer et al. 2013, S. 3)

2.1.2 Anlagen als mechatronische Einheiten

Technische Anlagen umfassen „die Gesamtheit der technischen Einrichtungen und Vorrichtungen zur Bewältigung einer festgelegten technischen Aufgabe“ (DIN IEC 60050-351, S. 33). Produktionsanlagen subsumieren eine „Zusammenstellung von Ausrüstung, die einen oder mehrere Rohstoffe umwandeln, trennen oder miteinander reagieren lassen, um Zwischen- oder Endprodukte zu produzieren“ (DIN EN 62264-1, S. 12). Die Fertigungsprozesse innerhalb eines Produktionssystems sind nach ihrem Mechanisierungsgrad zu differenzieren (Lotter 2012). In diesem Zusammenhang werden im Folgenden nur mechanisierte bzw. automatisierte Produktionsprozesse betrachtet. Die mechanisierten Betriebsmittel, in Form von Anlagen, können auch als mechatronische Systeme, die mechatronische Einheiten beinhalten, betrachtet werden (Lüder et al. 2010) (VDI 2206).

„Mechatronik bezeichnet das synergetische Zusammenwirken der Fachdisziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik beim Entwurf und der Herstellung industrieller Erzeugnisse sowie der Prozessgestaltung“ (VDI 2206, S. 9). Mechatronische Einheiten beinhalten die in Abbildung 4 dargestellten Elemente Grundsystem, Sensoren, Aktoren und eine Informationsverarbeitung.

Für die Charakterisierung eines Systems ist auch die Systemumgebung relevant. Das Grundsystem ist ein arbiträres physikalisches System mit mechanischer oder auch elektromechanischer Struktur. Die Sensoren dienen der Ermittlung von Zustandsgrößen des Grundsystems. Sie stellen die Eingangsgrößen für die Informationsverarbeitung für die

Bestimmung der Einwirkungen zur Realisierung der gewünschten Zustandsgrößen im Grundsystem bereit. Mithilfe der Aktoren erfolgt die Realisierung der Einwirkungen. Die Ein- und Ausgangsgrößen mechatronischer Einheiten umfassen Stoff-, Energie- und Informationsflüsse. Häufig ist die Informationsverarbeitung durch ein Kommunikationssystem mit weiteren Informationsverarbeitungseinheiten gekoppelt. Die Kommunikation mit dem Menschen ist über die Mensch-Maschine-Schnittstelle realisiert.

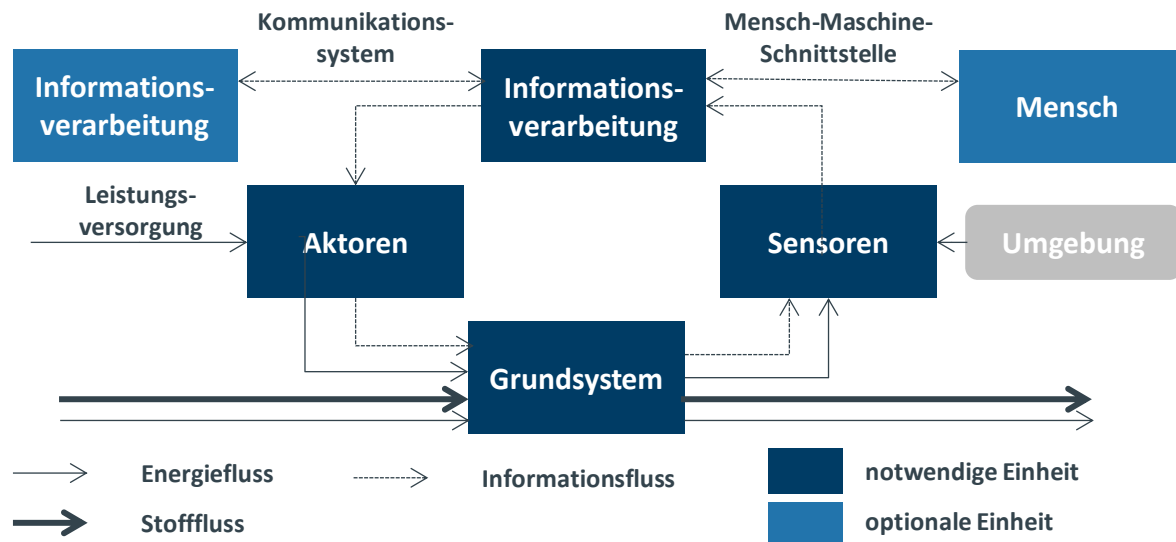


Abbildung 4: Grundstruktur einer mechatronischen Einheit (VDI 2206, S. 14)

Mechatronische Systeme beinhalten i.d.R. eine synergetische Integration verschiedener mechatronischer Systemelemente, die eine Gruppe zur Realisierung von Funktionen bilden. Die Gruppierung zu Modulen (vgl. Kap. 2.3) mit divergierenden Funktionen dient der Hierarchisierung des Gesamtsystems. Mit der Kopplung mehrerer Grundbausteine über ihre mechatronische Funktionsstruktur und über ihre mechanische Tragstruktur ergeben sich Systeme höherer Ordnung. Zur Realisierung weiterer Aufgaben werden auf höherer Ebene teilweise zusätzliche Sensorik und Informationsverarbeitungssysteme verwendet (VDI 2206). Die Produktionssystemstruktur wird im Folgenden näher betrachtet.

2.1.3 Produktionsstruktur in der Automobilindustrie

Die systematische Wiederverwendung von Entwurfselementen kann den Aufwand zur Anlagenherstellung erheblich reduzieren (vgl. Kap. 1.1), bedingt jedoch eine abgestimmte Strukturierung der Anlagen innerhalb der Engineering-Organisation (VDI/VDE 3695-1). Diese ermöglicht ein simultanes Engineering sowie die Abgrenzung der Engineering-Tätigkeiten. Resultierend bilden die folgenden Strukturierungsansätze die Basis für die Erstellung und Nutzung von wiederverwendbaren Entwurfselementen. Im Allgemeinen können technische Systeme nach verschiedenen Sichtweisen, auch als Aspekte bezeichnet, klassifiziert werden (DIN EN 81346-1):

- **Ortsaspekt:** Verdeutlicht die räumlichen Beziehungen zwischen den Komponenten eines Objektes,
- **Funktionsaspekt:** Verdeutlicht den funktionalen Zusammenhang zwischen den Komponenten eines Objektes,
- **Produktaspekt:** Verdeutlicht die konstruktiven Beziehungen der Komponenten eines Objektes und
- **Weitere Aspekte:** Sichtweisen, die nicht durch die vorherigen Aspekte abgedeckt werden.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht dient ein Produktionssystem der Herstellung eines Produkts und kann sowohl nur eine Anlage als auch ein Produktionsnetzwerk umfassen (Heinen et al. 2008). In der Literatur existiert kein Konsens bzgl. der Strukturierung von Produktionssystemen. Die Ebenendefinitionen der Autoren divergieren in Abhängigkeit der Zielsetzung der Forschungssichten, die im Allgemeinen in folgende Kategorien klassifiziert werden:

- **Ortsaspekt:** Als verbreiteter Ansatz ist es möglich, die Struktur der Produktion aus Fabrikplanungssicht abzuleiten. Aus dieser Fabrikperspektive ergeben sich Ebenen wie das Produktionsnetzwerk, das Unternehmen, die Fabrik, das Segment, die Anlage, die Zelle und die Station. Hierbei werden die verschiedenen Ebenen von den Fertigungsressourcen adressiert (Wiendahl et al. 2007) (Scholten 2007).
- **Funktionsaspekt:** Andere Forschungsarbeiten fokussieren auf die Fertigungsfunktion und die dafür erforderlichen direkten bzw. indirekten Systemkomponenten. Ausgangspunkt dieser Betrachtung bilden die direkten bzw. indirekten technologischen Funktionen eines Elementes für den Fertigungsprozess eines Produkts in Bezug auf das gesamte Produktionssystem. Aus dieser Sichtweise resultieren Ebenen wie z.B. die Zelle, die Hauptfunktionsgruppe, die Funktionsgruppe und die Teilfunktionsgruppe (Meling 2013) (Kiefer 2007).
- **Produktaspekt:** Im Mittelpunkt der verbleibenden Klasse von Forschungsarbeiten stehen die individuellen Komponenten des Produktionssystems, die das physische Verhalten des Produktionssystems definieren. Diese Forschungsarbeiten zielen i.d.R. auf Automatisierungsgeräte und mechatronische Systeme ab, und definieren z.B. Ebenen wie Funktionseinheit, Gerät und Gerätefunktionen (Lindemann et al. 2009) (DIN EN 62264-1).

- **Weitere Aspekte:** Diese Gruppe kombiniert die vorherigen Architekturen zu einer integrierten Struktur. Hierzu zählt u.a. auch das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0) der Industrie 4.0-Initiative (DIN SPEC 91345). Dieses bietet eine allgemeine Struktur für ein durchgängiges Engineering. Neben dem Lebenszyklus des Produktionssystems werden auch die Lebenszyklen des Produkts oder des Auftrags berücksichtigt. Infolgedessen ist eine ganzheitliche lebenszyklusübergreifende Optimierung möglich. Zu diesem Zweck werden die verschiedenen auf das Produktionssystem bezogenen Lebenszyklusphasen mit den Steuerungshierarchien und den Wertschöpfungsketten des Produktionssystems und seiner Umwelt kombiniert (VDI/VDE 2015).

Zusammenfassend existieren in Abhängigkeit der Sichtweise und der Phase innerhalb des Produktlebenszyklus (vgl. Kap. 2.2) verschiedenste Strukturierungsansätze in der Literatur. Die Extension der Ebenen erstreckt sich von großen Produktionsnetzwerken bis zu kleinen mechatronischen Einheiten oder mechanischen Objekten.

2.2 Wiederverwendung im Produktlebenszyklus von Anlagen

Die Einordnung des Begriffs der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering setzt eine Betrachtung des Lebenszyklus zur Darstellung des Zeitbezugs „von Vorgängen und Identifizierung charakteristischer Bereiche (Phasen, Hauptphasen, Subphasen) auf Basis des Verlaufs“ (Herrmann 2010, S. 63), voraus. Ein Zyklus kann allgemein als Kreislauf regelmäßig wiederkehrender Dinge oder Ereignisse bzw. Reihe und Abfolge von Phasen interpretiert werden (Zehbold 1996) (Wübbenhorst 1992). Einzelne Phasen können sich hierbei in ihrer Chronologie überlappen bzw. wiederholen. Folglich ist zwischen periodischen und einmaligen Zyklen zu differenzieren. Das Konzept des Lebenszyklus fußt auf dem Gesetz des „Werdens und Vergehens“ aus der Biologie (Freudenmann 1965) und ist auch auf technische Systeme übertragbar (Faßbender-Wynands 2001).

Innerhalb eines nachhaltig wirtschaftenden Unternehmens ist lebenszyklusorientiertes Handeln unabdingbar (Herrmann 2010). Die Ursprünge des betriebswirtschaftlichen Kontexts des Lebenszyklus liegen im Produktmarketing in den 1950er Jahren mit Bezug auf dem Marktzyklus eines Produkts (Faßbender-Wynands 2001).

(Herrmann 2010) klassifiziert drei Arten von Lebenszyklusmodellen. Flussorientierte Lebensphasenkonzepte sind durch einen sequenziellen Ablauf charakterisiert und bilden

den zeitlich logischen Lebensweg von Produkten ab. Die Dynamik der Systeme und damit der Verlauf von Parametern werden im Gegensatz zu den zustandsorientierten Lebenszykluskonzepten nicht betrachtet. Mit der Einführung der integrierten Lebenszykluskonzepte werden die beiden Modelle miteinander kombiniert und im Sinne einer ganzheitlichen Betrachtung auch die dem Marktzyklus vorgelagerte Beobachtungs- und Entstehungsphase und nachgelagerte Nachsorge- und Entsorgungsphase erfasst (Schild 2005). Die Beobachtungsphase kann hierbei sowohl als vorgelagerter Zyklus als auch als simultaner Zyklus aller Phasen gesehen werden (Herrmann 2010).

Der integrierte Produktlebenszyklus (vgl. Abbildung 5) startet mit der Suche, Bewertung und Auswahl einer geeigneten Produktidee. Im Rahmen dieser Entstehungsphase erfolgen weiterhin die Forschung und Entwicklung sowie die Produktions- und Absatzvorbereitung für die definierte Produktidee. Vor der Einführung auf dem Markt werden die Produkte während der Fertigungsphase produziert. Mit dem Marktzyklus geht auch der Nachsorge- bzw. Entsorgungszyklus einher, mit dem Dienstleistungen, wie z.B. Wartungen, verbunden sind. Abschließend beginnt die Rücknahme sowie Entsorgung der Produkte und es beginnt ggf. ein neuer Produktlebenszyklus (Schild 2005).

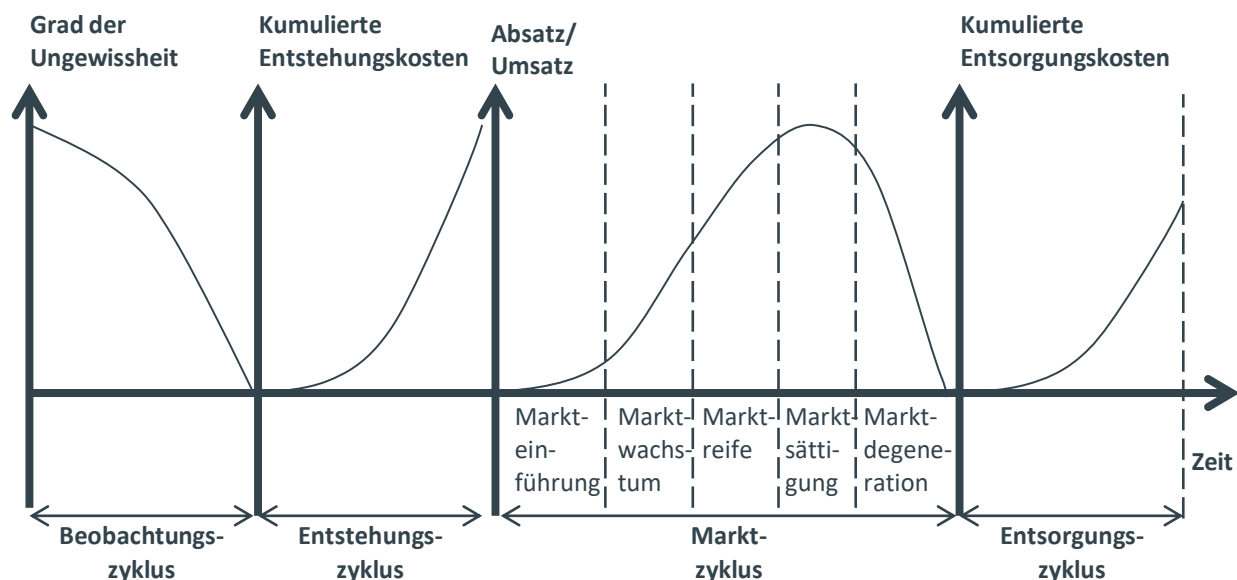


Abbildung 5: Integrierter Produktlebenszyklus (Herrmann 2010, S. 72) (Horneber 1995)

Integrierte Lebenszykluskonzepte können neben Konsumprodukten auch für weitere Betrachtungsobjekte, wie z.B. Unternehmen, Technologien oder Anlagen, adaptiert werden. Zwar dient diese Konzepte der Ansatz zur zeitlichen Strukturierung des Betrachtungsobjektes über mehrere Perioden, doch divergieren die Phasen der Konzepte im Umfang, der Benennung sowie der Strukturierung (Schild 2005) (Zehbold 1996).

Neben dem Betrachtungsobjekt ist auch die Intention der Betrachtung für die Strukturierung essenziell. Beispielsweise differenziert die (DIN EN 60300-3-3, S. 6) für Investitionsgüter zwischen folgenden sechs Hauptphasen innerhalb des Produktlebenszyklus:

- Konzept und Definition,
- Entwurf und Entwicklung,
- Herstellung,
- Einbau,
- Betrieb und Instandhaltung und
- Entsorgung.

Diese fein strukturierten Zyklen lassen sich jedoch auch in das dreiphasige Modell des Produktlebenszyklus integrieren. Im Folgenden wird eine Dreiteilung des Produktlebenszyklus analog der Normen (VDI 2884) sowie (VDMA 34160) für Investitionsgüter, wie die zu betrachtenden Anlagen, in Entstehungs-, Nutzungs- und Entsorgungszyklus vorgenommen. Im Hinblick auf die Problemstellung (vgl. Kap. 1.2) liegt der Fokus auf der Entstehungsphase und dort insbesondere auf der Planung und dem Engineering (vgl. Kap. 2.3) zur Reduzierung der Risiken. Die Betrachtung der Risiken und auch des Anlagenlebenszyklus erfolgt aus Sicht des Betreibers. Abbildung 6 visualisiert die zeitliche Einordnung des betrachteten Engineering-Umfangs im Produktlebenszyklus.

Die Entstehungsphase beinhaltet alle Aktivitäten, die zur Nutzung eines Produkts erforderlich sind. In Bezug auf das Produktionssystem endet diese Phase mit dem Erreichen der Kammlinie der Produktion. Während das Engineering des zu fertigenden Konsumgutes sowie der Fertigungsprozesse und der damit verbundenen Anlagenplanung i.d.R. Aufgabe des Anlagenbetreibers ist, findet das anschließende Engineering der Anlage zu meist beim Anlagenbauer statt (vgl. Kap. 2.3). Der Original Equipment Manufacturer (OEM) hingegen verantwortet das Gesamtprojekt (Wiendahl et al. 2002) zur Herstellung des neuen Produkts. Intention der Anlagenplanung des OEM ist die Beauftragung des Anlagenbauers (Wiendahl et al. 2002) (Döbele 2009). Vor der Nutzung der Anlage erfolgen i.d.R. die Teilfertigung, Teilebeschaffung sowie eine Vormontage für erste Tests (vgl. z.B. (Schuh und Westkämper 2006) (Weber 2006)). Anschließend werden die Anlagen für den Versand demontiert und zum späteren Einsatzort befördert. Abschließend beginnt mit der Montage das Errichten der Anlage bis zum Inbetriebnahmebeginn. Dies umfasst die mechanische Fertigstellung des Umfangs (Weber 2006). Teilweise sind zu diesem Zeitpunkt bereits einzelne Teilanlagen im funktions- und leistungsgerechten Betrieb.

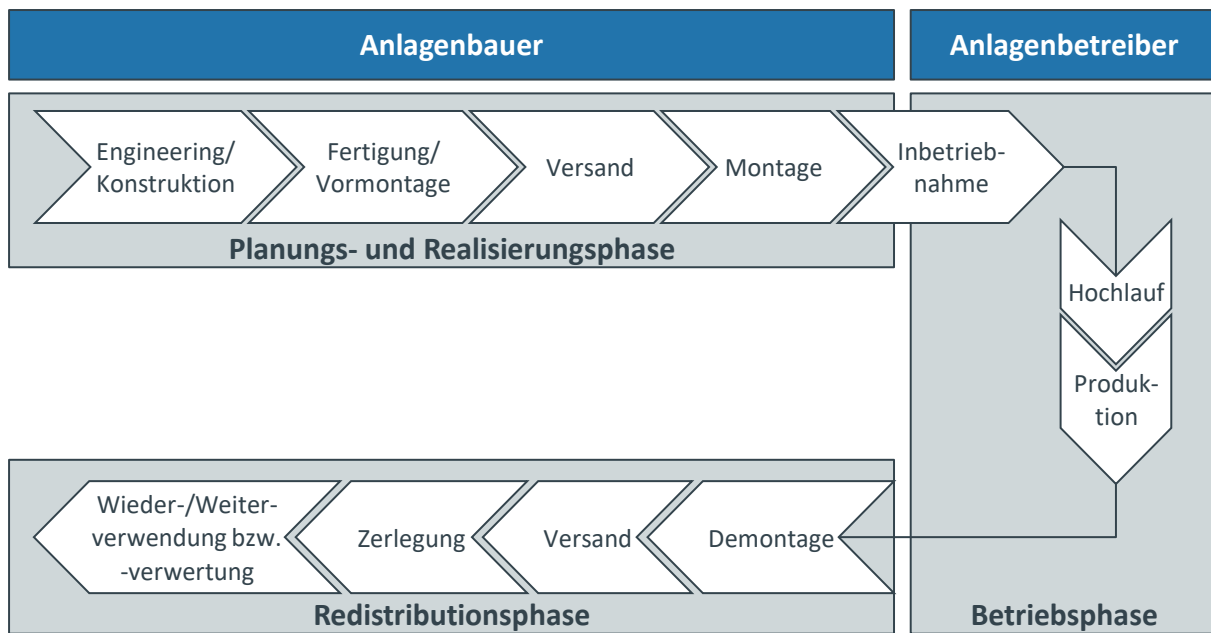


Abbildung 6: Betriebsphasen im Lebenszyklus von Produktionssystemen (Wiendahl et al. 2002, S. 651)

Im Anlauf eines Produktionssystems überschneiden sich die Phasen des Anlagenengineerings und der Anlagenutzung. Im Rahmen des Anlaufs werden die vorherigen Engineering-Aktivitäten, wie z.B. Produkt-, Fertigungs- sowie Anlagenplanung zu einem Produktionssystem zusammengeführt. Unzulänglichkeiten vorheriger Planungsphasen treten häufig erst mit der Produktion erster Produkte bzw. mit steigender Ausbringung auf. Infolgedessen werden häufig reaktive Maßnahmen zur Minimierung der Differenz zwischen Soll- und Ist-Anlaufkurve getroffen (Wiendahl et al. 2002).

Teilweise wird im Rahmen des Anlaufs zwischen Inbetriebnahme sowie dem Hochlauf des Produktionssystems differenziert. Rechtlich ist weiterhin zwischen dem „In Betrieb nehmen“ und der „Inbetriebnahme“ zu differenzieren. Das „In Betrieb nehmen“ von Anlagen entspricht der Endprüfungsphase einer Anlage und liegt in der Verantwortung des Anlagenbauers. Chronologisch folgt dieser die „Inbetriebnahme“, in der der Anlagenhersteller mit der Europäischen Gemeinschaft (EG) - Konformitätserklärung und der CE-Kennzeichnung die Einhaltung aller Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen garantiert (DIN EN ISO 12100). Der Fokus dieser Arbeit liegt nicht auf dem Augenblick der „Inbetriebnahme“ sondern der Phase des „In Betriebnehmens“. Die Begriffe werden im Folgenden synonym verwendet.

Die betriebliche Integrationsphase von Produktionssystemen im Sinne der Inbetriebnahme umfasst (Weber 2006, S. 13):

- **Herstellung der Betriebsbereitschaft:** Subsumiert die Tätigkeiten zur Vorbereitung des Anfahrens der Anlage. Folglich ist dies der Übergangszeitraum zwischen der Protokollierung der mechanischen Fertigstellung und dem Probetrieb.
- **Probetrieb:** Erstes Betreiben einer Anlage unter Betriebsbedingungen mit der Intention, die Anlage auf die vertraglich vereinbarten Leistungsparameter zu optimieren und die Nutzungsfähigkeit für den Dauerbetrieb zu gewährleisten.
- **Garantiversuch (bzw. Leistungsfahrt):** stellt den vertraglich vereinbarten Betriebszeitraum zur Erbringung des rechtsverbindlichen Leistungsnachweises dar.

Häufig ist das Anlagenverhalten nach der Abnahme durch den Betreiber noch nicht stabil. In diesem Zusammenhang dient die Inbetriebnahme der Sicherstellung der Funktionsbereitschaft und des funktionalen Zusammenwirkens der Einzelkomponenten. Im Rahmen des Hochlaufs „...wird die Anlage beim Nutzer unter ihren nominellen, personellen, organisatorischen und technischen Randbedingungen auf eine dauerhafte Nennleistung gebracht. Dazu werden im Rahmen der Optimierung und Stabilisierung des Betriebsverhaltens insbesondere die jetzt erst erkennbaren technischen, personellen und organisatorischen Unzulänglichkeiten und technischen Frühausfälle behoben“ (Wiendahl et al. 2002, S. 651).

Die Nutzungsphase des Produktionssystems subsumiert die gesamte Dauer, die eine Anlage zur Herstellung eines Produkts genutzt wird. Während dieser Phase wird die Anlage gesteuert, ggf. instand gesetzt und an sich ändernde Rahmenbedingungen angepasst, um ggf. die Nutzungsdauer zu verlängern. Mit der Anpassung der Anlage geht auch ein erneutes Engineering einher (VDI 2884) (Wiendahl et al. 2002).

Die letzte Phase des Produktlebenszyklus ist der Entsorgungszyklus, der nach der letzten Nutzung der Anlage bzw. der Herstellung des letzten Produkts beginnt und mit dem Recycling endet. In Analogie zum Produktlebenszyklus, der in Kreisläufen abläuft, wurde das Kreislaufwirtschaftsgesetz zum Recycling von Altprodukten erlassen. Neben der Differenzierung des Recyclings entsprechend dem Produktlebenszyklus klassifiziert die (VDI 2243, S. 35) die Recyclingprozesse in:

- **Verwendung:** Erneute Nutzung von gebrauchten Produkten für denselben (Wiederverwendung) oder einen anderen (Weiterverwendung) Verwendungszweck unter Nutzung ihrer Gestalt,
- **Verwertung:** Auflösung der Produktgestalt zur stofflichen und/oder energetischen Nutzung und

- **Beseitigung:** Ablagern (Deponieren) oder Verbrennen ohne Energiegewinnung.

Entspricht der Differenzierung nach dem Erstverwendungszweck ist eine Untergliederung in Wieder- oder Weiterverwendung möglich. Mit der erneuten Verwendung beginnt ein neuer Lebenszyklus. Zusammenfassend ergibt sich eine Verknüpfung von Lebenszyklen (vgl. Abbildung 7).

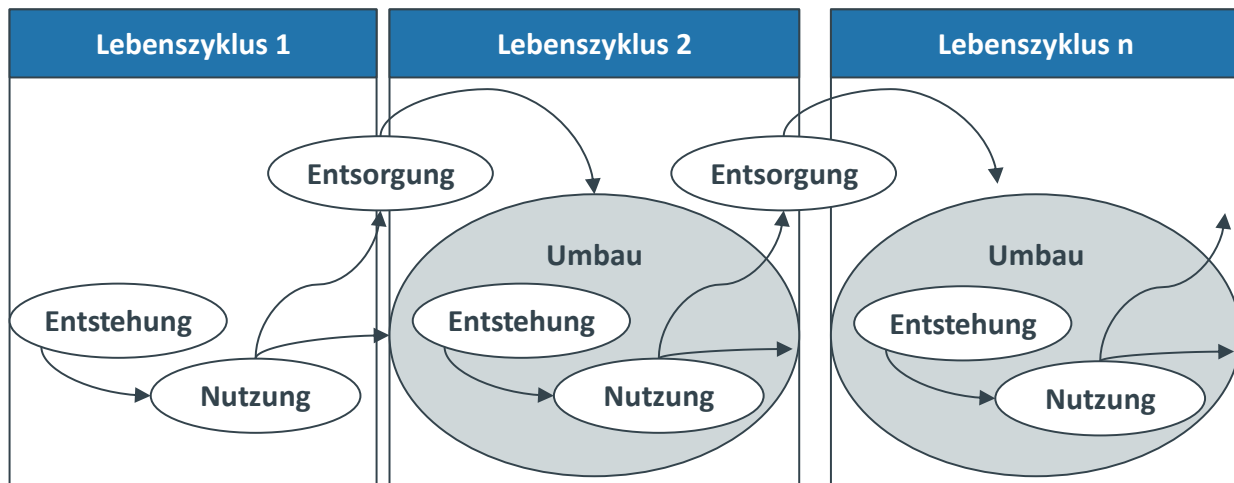


Abbildung 7: Verknüpfung von Produktlebenszyklen/ Wiederverwendung (Lüder et al. 2017b)

Der ökonomische sowie ökologische Erfolg des auf der Ressource zu fertigenden Produkts bedingt eine geschäftspartnerübergreifende Betrachtung der Lebenszyklen der Elemente eines Produkts (Herrmann 2010). Neben der Möglichkeit, dass der Lebenszyklus eines Systems in den Zyklus einer höheren Systemebene eingebettet ist, bestehen auch Wechselwirkungen der Lebenszyklen von Ressourcen und Produkten (Schenk et al. 2014) (Pohl 2013). Im Kontext der Industrie 4.0-Initiative sind die Lebenszyklen von Produkt, Auftrag und Ressource zu berücksichtigen, da diese miteinander verknüpft sind (VDI/VDE 2015). Weiterhin gilt es, den Lebenszyklus der Fertigungstechnologie zu berücksichtigen (Schmidt et al. 2015) (Gössling 2014).

Die Verknüpfung von Produkt- und Anlagenanforderungen zeigen sich auch im PPR-System (vgl. Kap. 2.1.1). Der Fertigungsprozess des Produkts determiniert die Gestaltung der Anlage und gleichermaßen bestimmen die technologischen Möglichkeiten der Anlage die Gestaltung des Produkts. Der Fertigungsprozess bildet somit die Grundlage für die Anlagenplanung. Resultierend zeigt sich die Vorteilhaftigkeit modularer Ressourcen. Bedingt durch die dynamischen Veränderungen der Fertigungstechnologien über die Zeit, können Schrittmachertechnologien bei Bedarf inkrementell in die Produktion integriert werden (Bullinger 1994). In diesem Zusammenhang sinken u.a. die Produktionskosten, wodurch ggf. die Lebenszyklen der Ressource sowie des Produkts verlängert werden.

Gleichermaßen ist für die Verlängerung der Anlagenlebenszyklen eine ressourcengerechte Konstruktion neuer Produkte erforderlich (Schuh 2012).

2.3 Wiederverwendungsgerechte Produktarchitektur

Die systematische Wiederverwendung von Elementen bedingt eine übergreifende Produktarchitektur. Diese subsumiert die Funktions- und Produktstruktur (vgl. Kap. 2.1.3) sowie deren Transformation (Schuh 2012). Eine trennscharfe Differenzierung bzgl. der Produktstrukturtypen ist nicht immer gegeben. Abhandlungen finden sich bspw. in (Schröck 2016), (Bursač 2016), (Ehrlenspiel et al. 2014) und (Nyhuis 2008). Im Folgenden werden die essenziellen Produktstrukturtypen für Anlagen erläutert.

- **Modul:** Physisches Bauteil oder Baugruppe, das mit „fest definierten Schnittstellen in seiner Funktion unterschiedlich ausgeprägt sein kann“ (Schuh 2012, S. 133). „Ein Modul ist ein Subsystem, dessen Grenzen nach fertigungstechnischen und funktionalen Gesichtspunkten festgelegt sind, mit dem Ziel, es unabhängig vom Gesamtsystem entwickeln, konstruieren, fertigen und prüfen zu können“ (Feldhusen und Gebhardt 2008, S. 38). Module dienen der Trennung von Produktarchitektur und -lebenszyklus (Schuh 2012). Im Sinne der (VDI 2221) ist eine Unterteilung der Produktarchitektur in Module für eine Optimierung hinsichtlich Planung, Entwicklung, Beschaffung, Fertigung, Montage und Service zielführend (Ehrlenspiel et al. 2014). Diese fertigungstechnischen Sichtweisen ergänzt (Bursač 2016, S. 49) für mechatronische Systeme wie folgt: „Ein Modul ist ein technisches Subsystem, das sich durch andere technische Subsysteme ersetzen lässt, sodass die Menge aller Funktionen oder Attribute des technischen Systems variiert wird“ (Albers et al. 2015). Module sind beispielsweise Navigationsgeräte im PKW.
- **Baureihen:** „Technische Gebilde, die dieselbe Funktion mit der gleichen Lösung, in mehreren Größenstufen und bei möglichst gleicher Fertigung in einem weiten Anwendungsbereich erfüllen“ (Schuh 2012, S. 133). In diesem Zusammenhang wird die qualitative Funktion eines Produkts beibehalten und die Skalierung erfolgt über die Ausprägung einzelner Attribute wie z.B. Abmessung, Leistung oder auch Anzahl (Ehrlenspiel et al. 2014) (Albers et al. 2015). Beispielhaft sei an dieser Stelle auf Motoren und Aggregate verwiesen (Schuh 2012).
- **Baukästen:** Bilden im Gegensatz zu Baureihen ein flexibles Kombinationssystem ab. Dieses System enthält verschiedene definierte Bausteine und kann u.a. auch

Baureihen enthalten. Die Menge der enthaltenen Subsysteme unterliegt dem zugehörigen Baukastenregelwerk (Albers et al. 2015). Die Bausteine eines Baukastens sind unter Berücksichtigung ihrer Schnittstellendefinition frei kombinierbar und können verschiedene Gesamtfunktionen erfüllen (Ehrlenspiel et al. 2014). Es existieren unterschiedliche Ausprägungen von Baukästen, u.a. modulare, strukturgebundene, abstrakte, ein-/mehr-direktionale, voll-/ unvollständige sowie offene und geschlossene (Schuh 2012). Typische Anwendungen von Baukästen sind z.B. Schaltschränke.

- **Plattform und Hut:** Ist ein Gleichteilkonzept aus Subsystemen (Bausteine, Baureihen oder Module), die unverändert zur Realisierung in unterschiedlichen Produkten innerhalb einer Produktfamilie (Systemen) zum Einsatz kommen (Ehrlenspiel et al. 2014) (Feldhusen und Gebhardt 2008) (Albers et al. 2015). Änderungen von Bausteinen wirken sich im Gegensatz zu Baukästen auf weitere Produkte auf Basis der Plattform aus. Im Gegensatz zu Baukästen müssen die produktspezifischen Anbauten (Hutmodule) nicht beliebig kombinierbar bzw. tauschbar sein (Feldhusen und Gebhardt 2008). Typischer Vertreter ist der Automobilbau mit ausführungsnutralen Produktplattformen (Schuh 2012), wie z.B. der Modulare Querbaukasten (MQB) sowie produktspezifische Anbauteile, z.B. Sitze für das Fahrzeug Modell Golf 7.
- **Produktlinie:** Subsumiert eine „organisatorische Zusammenfassung von Produktfamilien und spezifischen Gesichtspunkten“ (Gebhart et al. 2016, S. 121), wie zum Beispiel Funktionsprinzipien oder auch Produktionsverfahren (Gebhart et al. 2016). Die Produktlinie fokussiert auf den variablen Anteil von Subsystemen, der zwischen Produktfamilien variiert, sowie dessen Gestaltung (Schröck 2016).
- **Pakete:** Dienen der Beschränkung von Kombinationsmöglichkeiten, in dem sie Restriktionen bzgl. der Kombination von Anbauteilen und Funktionen vorgeben (Schuh 2012).

2.4 Wiederverwendungsansätze im Anlagenengineering

Auf Basis der abgestimmten Produktarchitektur können verschiedene Ansätze für die Wiederverwendung genutzt werden. In der (VDI/VDE 3695-3) sowie (Maga 2013) werden verschiedene Zielzustände für die Wiederverwendung klassifiziert (vgl. Kap. 2.5.3). (Schröck 2016) differenziert fünf Wiederverwendungsmechanismen und ordnet diese Zielzuständen zu (vgl. Tabelle 1).

- **Copy, Paste and Modify:** Bestehende Artefakte werden aus anderen Projekten kopiert und ggf. angepasst.
- **Typ-Instanz-Konzept:** Einem Objekt sind Merkmale, Merkmalswerte und Operationen zugeordnet. Diese Objekte können zu Klassen gruppiert werden. Aus den Klassen (Typen) können abgeleitete Objekte (Instanzen) hervorgehen, die die charakterisierten Eigenschaften der Klasse aufweisen.
- **Templates:** Vorlagen bzw. Schablonen zur strukturierten Bereitstellung von Informationen zur Wiederverwendung
- **Pattern:** Wiederverwendung von Vorgehensweisen und Problemlösungsansätzen.
- **Bibliotheken:** Systematisches, nachvollziehbares Ablegen von Elementen für den Anwender.

Tabelle 1: Wiederverwendungsansätze- und Mechanismen (Schröck 2016, S. 21)

(Maga 2013)	(VDI/VDE 3695-3)	Wiederverwendungsmechanismen
„Ad-hoc“ Wiederverwendung	Zielzustand A	Copy, Paste and Modify; Typ-Instanz-Konzept
Opportunistische Wiederverwendung	Zielzustand B	Typ-Instanz-Konzept; Templates Pattern; Bibliotheken
Systematische Wiederverwendung	Zielzustand C	Ggf. Typ-Instanz-Konzept; Templates; Pattern; Bibliotheken
Produktlinienbasierte Wiederverwendung	Zielzustand D	Pattern
	Zielzustand E	

2.5 Wiederverwendung in der Fabrikplanung und Anlagenkonstruktion

Das folgende Kapitel dient der Analyse der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering, denn für die zu realisierenden Effizienzsteigerungen (Wolff et al. 2003) durch die Wiederverwendung ist eine Ablaufbeschreibung unabdingbar. Spezifische Planungsmethoden (vgl. Kap. 2.5.7) finden im Folgenden keine detaillierte Betrachtung. Im Fokus stehen die Planungsmethoden der VDI-Richtlinien, die den Stand der Technik aggregieren. Für das Anlagenengineering finden sowohl die Normen der Fabrikplanung (VDI 4499-2), (VDI 5200-1) und (VDI/VDE 3695-1) als auch die Normen der Konstruktion und Entwicklung von Produkten (VDI 2221), (VDI/VDE 2422) und (VDI 2206) Berücksichtigung. Die Sicht auf das zu konstruierende bzw. zu entwickelnde Produkt variiert je nach Standpunkt. Während es sich aus Sicht der OEM's um das Fahrzeug handelt, betrachtet der Anlagenlieferant die Anlage und der Komponentenhersteller seine Komponente als Produkt.

2.5.1 VDI 4499 - Digitale Fabrik

Intention der VDI-Richtlinie 4499 ist die Einführung der Digitalen Fabrik zur Parallelisierung von Produktentwicklung sowie Fabrikplanung zur Verkürzung von time-to-market sowie Steigerung der Produktqualität (vgl. Abbildung 8). In diesem Zusammenhang sind beide Prozesse möglichst frühzeitig zu digitalisieren, ein gemeinsames integriertes Datenmanagement für beide Prozesse zu nutzen sowie die Prozesse zu parallelisieren und die Ergebnisse von Produktentwicklung sowie Fabrikplanung frühzeitig virtuell abzusichern. Im ersten Teil der VDI 4499 werden die Phasen des Lebenszyklus der Digitalen Fabrik mit den Marktanforderungen, der Produktenwicklung, dem Prototypenbau, der Produktions- und Montageplanung, dem Produktionsprozess sowie der Serienproduktion sowie dem Service sowie der Instandhaltung der Fabrik vorgestellt (VDI 4499-1).

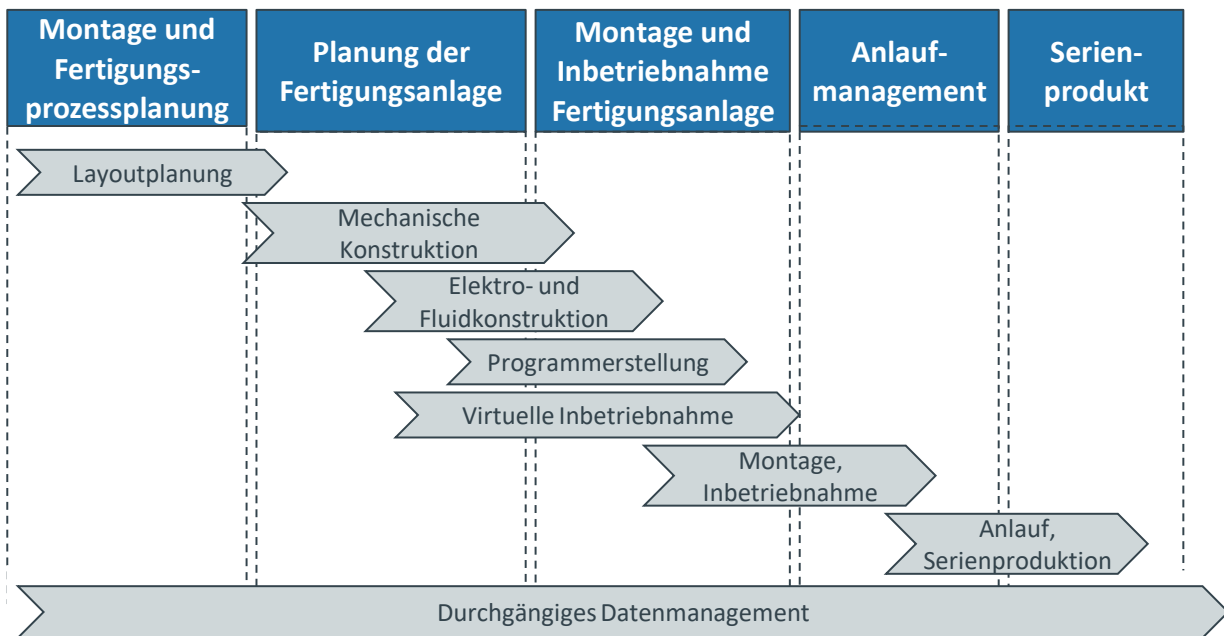


Abbildung 8: Planungsprozess für Fertigungsanlagen (VDI 4499-2, S. 10)

Der zweite Teil der VDI 4499 stellt das Vorgehen bei der Digitalen Fabrik im Fabriklebenszyklus vor. Eingangs beginnt die Montage- und Fertigungsprozessplanung mit der Auswahl geeigneter Prozesse, Technologien und Ressourcen für die Herstellung des Produkts. In diesem Zusammenhang wird auch das Layout erstellt. Anschließend werden die Fertigungsanlagen geplant. Die Prozesse der mechanischen Konstruktion, Elektro- und Fluid-Konstruktion sowie der Programmerstellung überlappen sich zeitlich und arbeiten alle mit einer gemeinsamen Datenbasis. Bereits während der Anlagenplanung beginnt die virtuelle Inbetriebnahme zur Überprüfung der Entwürfe. Anschließend erfolgt die Anlagenmontage und -inbetriebnahme. Die Anlage wird physisch montiert und in Betrieb genommen. Mit dem erfolgreichen Anlauf der Serienproduktion endet die Fa-

brikplanung. Die Ergebnisse des Anlaufs dienen der Validierung der Konsistenz der Modelle der Digitalen Fabrik für weitere Planungsprojekte (VDI 4499-2).

Die Standardisierung von Planungsprozessen ist ein Ziel im Kontext der Digitalen Fabrik. Sie fördert u.a. die Wiederverwendung von virtuellen Modellen aus Planung und Entwicklung für weitere Projekte. Sind die Ressourcen auf Komponenten-, Modul- oder Anlagenebene der im Planungsprozess Beteiligten standardisiert, können diese in Bibliotheken hinterlegt werden. Anlagen können somit projektübergreifend aus einzelnen Elementen, wie z.B. Komponenten und Baugruppen, konfiguriert werden. Hierfür muss die Struktur von Projekten und Anlagen einheitlich definiert sein. Weiterhin können somit Best-Practice Lösungen für Modelle sowie Planungsergebnisse erstellt und in Folgeprojekten eingesetzt werden (VDI 4499-2).

2.5.2 VDI 5200 - Fabrikplanung – Planungsvorgehen

In der (VDI 5200-1) "Fabrikplanung" wird eine Planungsvorgehensweise für die Fabrik unter Berücksichtigung aktueller Herausforderungen, wie globalisierte Märkte oder auch verkürzte Produktlebenszyklen, vorgestellt. Diese ist auch auf die vier Planungsfälle Neuplanung, Umplanung, Rückbau sowie Revitalisierung anwendbar. Das Planungsvorgehen gliedert sich in sieben Phasen (vgl. Abbildung 9), die teilweise iterativ durchlaufen werden (VDI 5200-1).

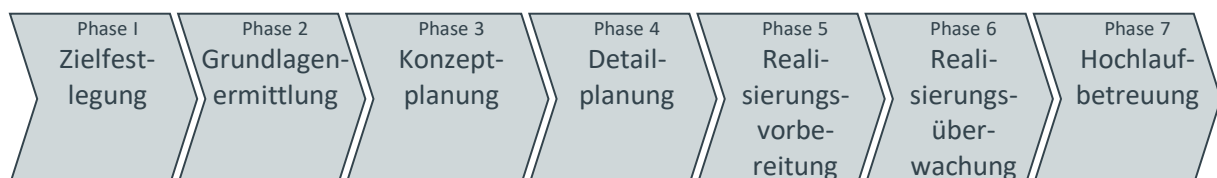


Abbildung 9: Phasenmodell des Fabrikplanungsprozesses (VDI 5200-1, S. 8)

Die erste Phase dient der Zielfestlegung. Hierfür werden die Unternehmensziele und Rahmenbedingungen analysiert. Aufbauend auf diesen Analysen fußt die Definition der Fabrik- und Projektziele. Beispiele hierfür bilden das Produktprogramms oder auch Kennzahlen wie die Kapazität der Produktionseinrichtung. Abschließend erfolgen die Erstellung von Bewertungskriterien für die Planungsvarianten und die Arbeitspaketdefinition im Rahmen der Projektplanerstellung (VDI 5200-1).

In der zweiten Projektphase werden die für die Planung erforderlichen Daten und Informationen erfasst, bewertet und erzeugt. Im Rahmen der dritten Phase Konzeptplanung erfolgt die Erstellung eines Fabrikkonzeptes, das den Prämissen der beiden vorherigen Phasen genügt. Dieser Prozess gliedert sich in vier Phasen mit iterativem Charakter. Zu Beginn werden das ideale Funktionsschema und Kommunikationskonzept für die Fabrik

in einem Strukturplan abgebildet. Anschließend beginnt die Dimensionierung der Ressourcen, des Logistikkonzepts sowie des flächenmaßstäblichen Funktionsschemas. Abschließend wird das ideale Layout der Fabrik erstellt und dieses unter Berücksichtigung verschiedenster Rahmenbedingungen diskutiert, um dieses in ein reales Layout zu überführen. Das Ergebnis ist ein Groblayout (VDI 5200-1).

In der vierten Phase, der Detailplanung, erfolgt die Ausplanung des zuvor ausgewählten Fabriklayouts. In diesem Zusammenhang wird ein Feinlayout der Fabrik mit den Ausführungsplänen der Gebäude sowie der resultierenden Kostenkalkulation erstellt. Hierfür werden die Lastenhefte (LH) für die notwendigen Ressourcen erarbeitet, die Prozessbeschreibungen für das Kommunikations- und Logistikkonzept konkretisiert sowie die notwendigen behördlichen Genehmigungsanträge erstellt (VDI 5200-1).

Die fünfte Phase subsumiert alle Aktivitäten für die Vorbereitung der Realisierung. Vor der Vergabe an einen Lieferanten müssen die Ausschreibungsunterlagen und eine Bieterliste mit potentiellen Anbietern, die die Ausschreibungsunterlagen erhalten, erstellt werden. Die Vergabe dient der Auswahl und Beauftragung von Lieferanten und der Definition der Leistungserbringung in einem Pflichtenheft. Anschließend wird die Ausführungsplanung des Lieferanten durch den Auftraggeber überwacht. Parallel zu den restlichen Aktivitäten im Rahmen der Realisierungsvorbereitung ist der Produktionsumstieg, bspw. hinsichtlich Erstversorgung für die Nullserie, die Baustelle, die Umzüge von Personal und Ressourcen sowie der Personalaufbau, vorzubereiten (VDI 5200-1).

In der sechsten Phase wird die Realisierung der zuvor geplanten Umfänge überwacht. Dies erfordert einerseits die Koordination aller an der Realisierung beteiligten Bereiche. Andererseits bedingt es auch die Überprüfung sowie die Dokumentation der vereinbarten Leistungserstellung bzgl. Qualität, Kosten und Zeit der Ressourcen sowie der Personalbeschaffung und -qualifikation. Zum Abschluss dieser Phase sind durch die Lieferanten alle Ausführungsunterlagen bereitzustellen und die erbrachten Kosten sowie Leistungen zu dokumentieren. Die vorletzte Phase umfasst die Anlauf- und Hochlaufbetreuung sowie die Bewertung der Fabrik auf Basis zuvor definierter Ziele (VDI 5200-1).

Die Fabrikplanung endet mit dem Projektabschluss, in dem die Güte des Planungsprozesses bewertet und das Projektwissen für künftige Projekte aufbereitet und dokumentiert werden. Für die spätere Wiederverwendung werden die Informationen und Ergebnisse rückwirkend analysiert, bewertet und dokumentiert (VDI 5200-1).

2.5.3 VDI 3695 – Engineering von Anlagen

Die Richtlinie VDI 3695 „Engineering von Anlagen – Evaluieren und optimieren des Engineerings“ fungiert als Ratgeber zur Verbesserung der Engineering-Organisation bezüglich ihres technischen, organisatorischen sowie wirtschaftlichen Rahmens. Die Tätigkeiten im Rahmen der Fabrikplanung werden in projektbezogene und projektunabhängige bzw. projektübergreifende Tätigkeiten differenziert (VDI/VDE 3695-1).

Für die zeitliche Zuordnung dieser Tätigkeiten bezieht sich die VDI 3695 auf das Arbeitsblatt (NA 035) und untergliedert das Projekt in vier Phasen. Projekte beginnen mit der Akquise, die der Determinierung aller für das Anlagenengineering relevanter Informationen dient. In der anschließenden Phase Planung erfolgen die Vor-, Basis- sowie die Ausführungsplanung. Während der anschließenden Realisierung werden die Anlagen erstellt. Im Anschluss findet die Inbetriebnahme mit dem Produktionsanlauf und -hochlauf statt. Die Projekte enden mit der Projektabschlussphase, die sowohl das Wissensmanagement als auch das Feedback für die projektunabhängige Entwicklung der Komponenten beinhaltet (VDI/VDE 3695-1) (vgl. Abbildung 10).

Die projektunabhängigen Aktivitäten fokussieren im Gegensatz zu projektabhängigen Tätigkeiten nicht auf die Abwicklung einzelner Kundenprojekte. Projektunabhängige Tätigkeiten umfassen beispielsweise die Spezifikation von Beschreibungssprachen, wiederbenutzbarer materieller und immaterieller Artefakte, Referenzmodelle und Technologien für die Anlagenstruktur (VDI/VDE 3695-2). Auch die Entwicklung von Datenmodellen für die Engineering Werkzeuge zählt zu den projektunabhängigen Tätigkeiten (VDI/VDE 3695-3). Analog zu den projektabhängigen Tätigkeiten gliedert sich auch der Prozess der projektunabhängigen Tätigkeiten in vier Phasen. Basis der anschließenden Entwicklung von Standards und wiederverwendbarer Artefakte bilden eine Analyse der Kunden- bzw. Marktanforderungen sowie die strategischen Rahmenbedingungen. Diese werden anschließend realisiert, getestet sowie abgenommen. Intention ist es, diese Ergebnisse anschließend in möglichst vielen Kundenprojekten zu realisieren (VDI/VDE 3695-1). Neben diesen Prozessen existieren noch weitere unterstützende Prozesse, wie beispielsweise Supply-Chain-, Qualitäts-, Konfigurations-, Risiko-, Change-, Customer- Relationship - sowie Wissensmanagement (VDI/VDE 3695-2).

In der VDI 3695 wird Wiederverwendung von Artefakten als Methode für einen effizienten Engineering-Prozess hinsichtlich Kosten, Zeit und Qualität vorgestellt. Die Umfänge der Artefakte sind domänen- und unternehmensspezifisch (VDI/VDE 3695-2).

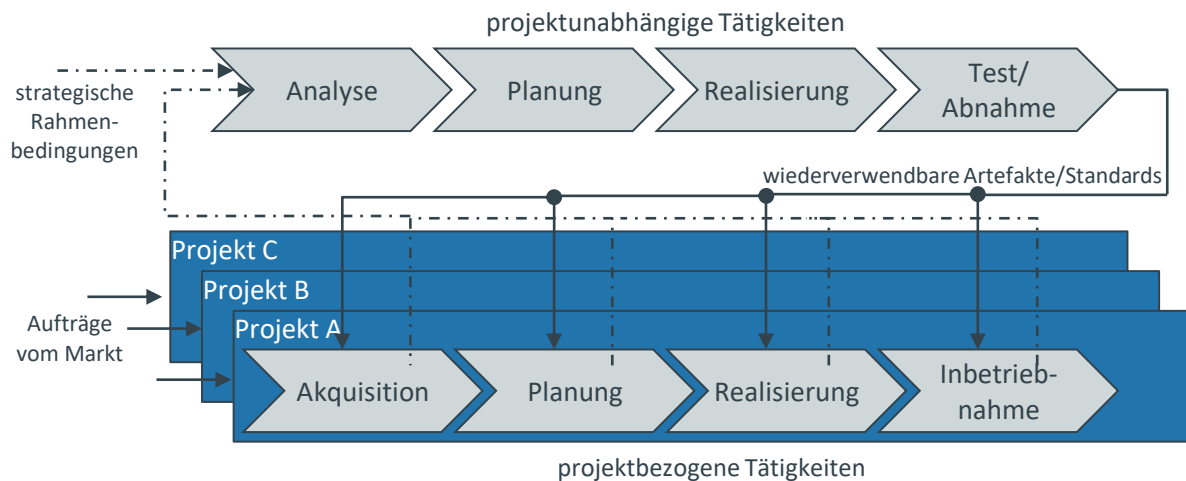


Abbildung 10: Wiederverwendung von Artefakten (VDI/VDE 3695-2, S. 4)

Wiederverwendung ermöglicht eine Optimierung des Engineering-Prozesses hinsichtlich Kosten, Zeit und Qualität. Bezüglich der Wiederverwendung wird in fünf Zielzustände differenziert (vgl. Tabelle 2). In diesem Zusammenhang werden dem Anwender mit den Indikatoren für die Zielzustände Hilfestellungen zur Realisierung der Zielzustände gegeben. Weiterhin werden die erforderlichen Maßnahmen sowie die damit verbundenen Kosten, Risiken sowie Chancen benannt.

Tabelle 2: Zielzustände der Wiederverwendung (VDI/VDE 3695-3)

Zustand	Beschreibung
A	Wiederverwendung wird selbstständig von Mitarbeitern betrieben
B	Wiederverwendung wird im Projekt gesteuert
C	Wiederverwendung wird projektübergreifend von zentraler Stelle aus gesteuert
D	Wiederverwendung basiert auf Referenzmodell
E	Wiederverwendung beruht auf internen und externen Standards

Der Anteil der wiederverwendbaren Artefakte in einer Anlage ist der Abdeckungsgrad. Dieser steigt von den strukturierten Anlagen mit beschriebenen Komponenten, über modulare Anlagen bis zu standardisierten Anlagen.

2.5.4 VDI 2221 - Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Die VDI 2221 beschreibt ein allgemeines Entwicklungsvorgehen. Die Richtlinie nutzt einen systemorientierten Problemlösungszyklus und beschreibt die einzelnen Phasen. Hierfür erfolgt eingangs eine Dekomposition des Gesamtproblems in kleine Teilprobleme (Top-Down), für welche anschließend Teillösungen gesucht werden. Diese Teillösungen werden danach zu einer Gesamtlösung zusammengesetzt (Bottom-Up) (vgl. Abbildung 11). In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung werden die im Folgenden vorgestellten Teilprozesse vollständig, teilweise oder iterativ bearbeitet (VDI 2221).

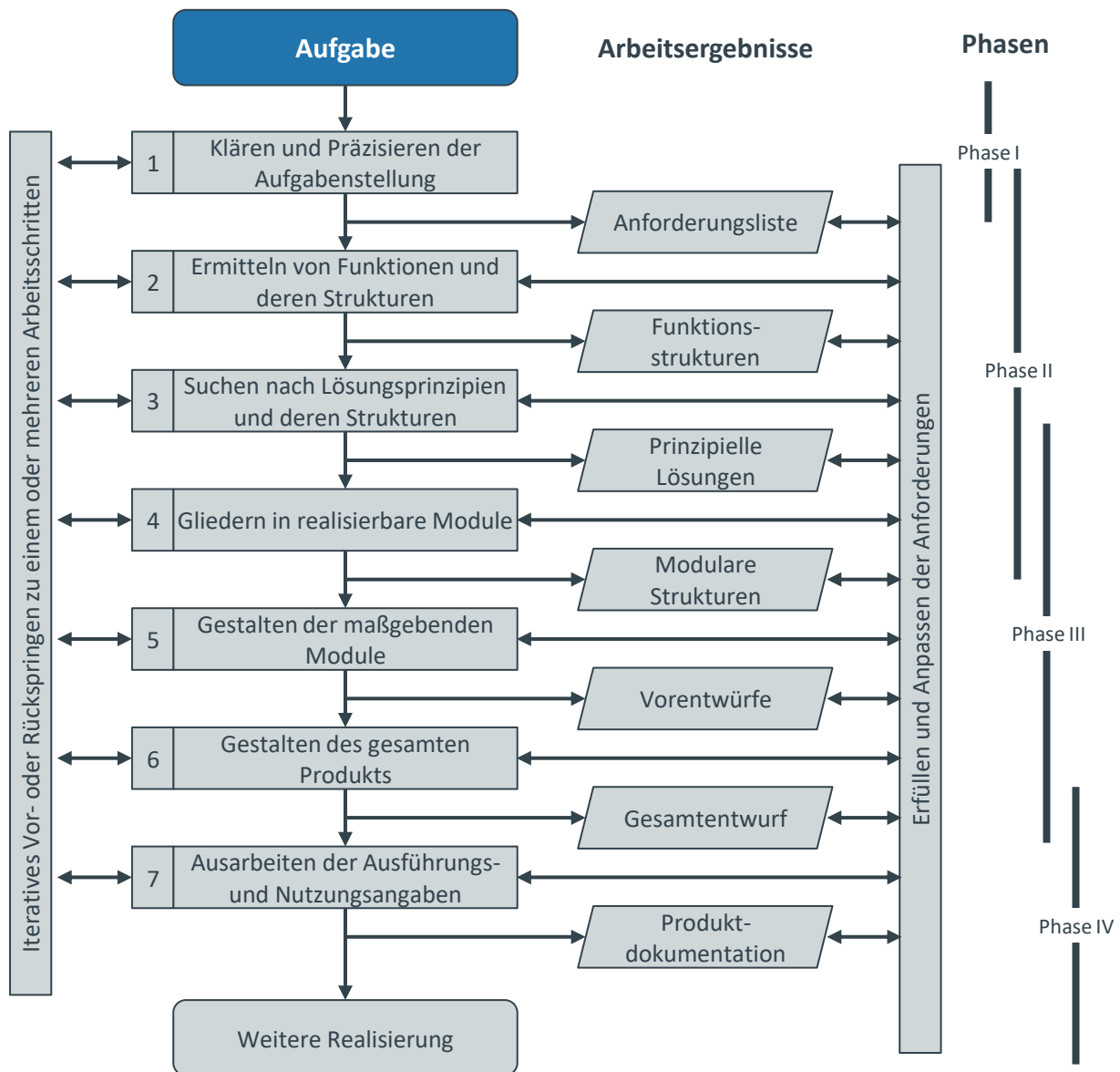


Abbildung 11: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren (VDI 2221).

Im ersten Schritt werden die Anforderungen der Kunden bzw. der Produktplanung in einer Anforderungsliste erfasst. Neben der Sammlung aller Informationen müssen Informationslücken geschlossen und ggf. sowohl unternehmensexterne als auch -interne Anforderungen überprüft und ggf. ergänzt werden. In diesem Zusammenhang ist auch die Aufgabenstellung zu formulieren. Die Anforderungsliste unterstützt die weiteren Engineering-Prozesse und ist entsprechend der aktuellsten Erkenntnisse anzupassen (VDI 2221).

Auf Basis der Anforderungsliste gilt es im zweiten Arbeitsschritt die Funktionen zu definieren. In diesem Zusammenhang müssen die Gesamtfunktion des Systems sowie die Hauptfunktionen beschrieben werden. Die Dekompositionstiefe variiert in Abhängigkeit von der Systemkomplexität. Die Abbildung der Teilfunktionen in einer oder mehrerer Funktionsstrukturen ist das Arbeitsergebnis dieses Teilprozesses (VDI 2221).

Für diese Funktionen werden im dritten Prozessschritt Lösungsprinzipien gesucht. Dies erfordert zu Beginn die Auswahl physikalischer, chemischer oder anderer Effekte, um diese anschließend durch wirkstrukturelle Festlegungen zu realisieren (VDI 2221).

Darauf aufbauend gilt es, diese Lösungsprinzipien in realisierbare Module zu gliedern. Als Ergebnis dieses Prozesses entstehen eine modulare Struktur der realen Gruppen und Elemente des Systems (vgl. Kap. 2.1.3) sowie deren Verknüpfung (VDI 2221).

Der fünfte Prozessschritt dient der Gestaltung der maßgebenden Module für die System- bzw. Produktoptimierung. Im Rahmen dieser Grobgestaltung werden geometrische, stoffliche und/oder programmtechnische Festlegungen nur soweit detailliert, dass auf dieser Basis ein Gestaltungsoptimum ausgewählt werden kann. Resultierend ergeben sich Vorentwürfe für die maßgebenden Module (VDI 2221).

Diese Vorentwürfe werden im sechsten Arbeitsschritt durch die Gestaltung und das Hinzufügen noch nicht bearbeiteter Module ergänzt sowie durch die Verknüpfungen aller Gruppen und Elemente definiert. Resultierend entsteht der Gesamtentwurf des Produkts bzw. Systems (VDI 2221).

Im letzten Arbeitsschritt werden die Ausführungs- und Nutzungsangaben erarbeitet. Die aus diesem Arbeitsschritt hervorgehende Produktdokumentation enthält alle notwendigen Nutzungsinformationen, wie z.B. die Stückliste oder auch Montageanweisungen.

Die VDI 2221 differenziert Entwicklungsprojekte u.a. in Weiter- und Neuentwicklungen von Baugruppen bzw. des Gesamtprodukts. Die Wiederverwendung von Entwurfselementen wird im vierten Prozessschritt zur Gliederung des Produkts in realisierbare Module für eine baukastenartige Struktur aufgegriffen. Zur Realisierung von Funktionen ist i.d.R. auf bewährte sowie käufliche Lösungen zurückzugreifen (VDI 2221).

2.5.5 VDI 2422 - Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik

Die VDI 2422-Richtlinie beschreibt eine Entwicklungsmethodik, die der zunehmenden Bedeutung von Geräten mit Steuerung durch Mikroelektronik gerecht wird (vgl. Abbildung 12). Im Fokus der Richtlinie stehen die Funktionsstruktur sowie der Informationsfluss des Gerätes (VDI/VDE 2422).

Ausgangsbasis für die Entwicklung bildet ein Anforderungskatalog des Auftraggebers, der in Abstimmung mit dem Auftragnehmer ein Pflichtenheft, das die verbindlich zu realisierenden Anforderungen bündelt, definiert (VDI/VDE 2422).

Unter Berücksichtigung dieser Anforderungen wird ein Gerätekonzept erstellt. Dieses Konzept umfasst alle Informationen über die Gerätefunktionen sowie deren Realisierung.

Der anschließende Entwurf und die Ausarbeitung der Lösung werden in Software, Schaltung und Elektromechanik getrennt (VDI/VDE 2422).

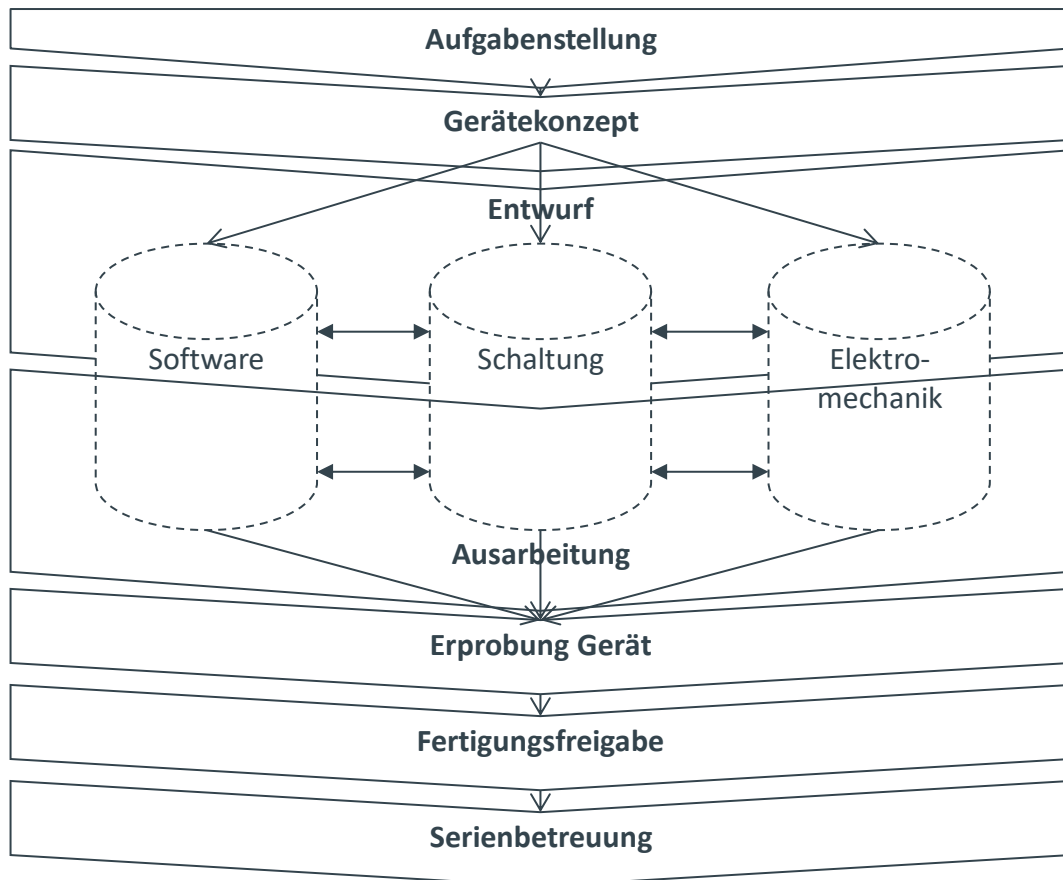


Abbildung 12: Vorgehensplan für die Entwicklung von Geräten mit Steuerung durch Mikroelektronik (VDI/VDE 2422, S. 15)

Der Softwareentwurf beinhaltet die Abgrenzung der zur realisierenden Aufgaben durch die Software sowie die Funktionsstruktur. Die Modularisierung der Funktionsstruktur erfolgt nach dem Top-Down-Ansatz. Einzelne Module können im Programmablauf mehrmals verwendet werden, müssen jedoch nur einmal entworfen werden. Während der Ausarbeitung der Software für die Gerätesteuerung erfolgt die Auswahl der Programmiersprache unter Berücksichtigung der zu realisierenden Steuerung und des verwendeten Mikrocomputer-Entwicklungssystems. Abschließend sind die Software in ablauffähige Programme zu codieren und die Geräte zu testen (VDI/VDE 2422).

Der Schaltungsentwurf startet mit der Präzisierung der Teilaufgaben und der darauf aufbauenden Lösungsfindung. Im ersten Schritt der Lösungsfindung wird eine Funktionsstruktur in Form von Blockschaltplänen und Funktionsbeschreibungen vorgenommen. Im Verlauf des Entwurfsprozesses nimmt die Detaillierung von Blocksymbolen, welche eingangs eine Black-Box symbolisieren und lediglich Input- sowie Output-Signale haben, zu, bis eine detaillierte Signalfussbeschreibung dokumentiert und die Blocksymbole durch

bekannte Funktionseinheiten, Module oder auch Schaltkreise ersetzt werden können. Anschließend werden diese Lösungsprinzipien verfeinert, sodass ein Entwurf entsteht, der die wesentlichen Hardwarerealisationen definiert. Während der folgenden Schaltungsanalyse wird dieser bewertet. Abschließend ist die Hardware hinsichtlich Störverhalten sowie Zuverlässigkeit zu überprüfen. Während der Schaltungsausarbeitung gilt es die Raumaufteilung der Baugruppen festzulegen und die Verdrahtungspläne zu erstellen. Weiterhin sind Layout und Bestückungspläne anzufertigen und die zur Herstellung erforderlichen Fertigungs- und Prüfunterlagen zu erstellen (VDI/VDE 2422).

Der Entwurf des elektromechanischen Geräteteils startet mit einem Grobentwurf. Dieser beinhaltet die Grundgeometrie, Energieversorgung, Platinen-Einbautechnik und den mechanischen Aufbau. Gleichzeitig wird die Benutzeroberfläche entworfen. Während des anschließenden Feinentwurfs werden die Bauelemente definiert sowie deren Störeinflüsse und Interdependenzen berücksichtigt. Mit der Erstellung von Fertigungs- und Betriebsunterlagen für die Dokumentation, wie z.B. Montage- oder auch Testanleitungen, im Rahmen der Ausarbeitung endet die Entwicklung des elektromechanischen Geräteteils (VDI/VDE 2422).

Wenn die Entwicklung in allen Bereichen abgeschlossen ist, wird der Entwicklungsstand getestet. Analog zur VDI 2221 werden in diesem Zusammenhang mehrere Iterationsschleifen mit z.B. Funktionsmuster, Prototyp, Nullserie und Serie durchlaufen. Insbesondere komplexe Produkte erfordern mehrere Iterationsschleifen zur Steigerung der Produktqualität sowie zur Reduzierung der Entwicklungszeit. Nach dem erfolgreichen Produktionsanlauf kann die Serienproduktion beginnen (VDI/VDE 2422).

Zusammenfassend fokussiert die VDI 2422 auf eine effiziente und wirtschaftliche domänenspezifische Trennung bei der Entwicklung von Geräten. Die Wiederverwendung von Entwurfselementen wird hierbei nur innerhalb eines Projektes betrachtet.

2.5.6 VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Die VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“ dient als Richtlinie zur Entwicklung von Produkten, welche die Kombination von Maschinenbau, Elektro- und Informationstechnik erfordern. Sie ergänzt die Richtlinie (VDI 2221), die eine allgemeine Entwicklungs- bzw. Konstruktionsmethodik beschreibt, sowie die Richtlinie (VDI/VDE 2422), die auf die Mikroelektronik in der Gerätetechnik fokussiert, um ein durchgängiges sowie domänenübergreifendes Vorgehen (VDI 2206). Das Vorgehen zur Entwicklung mechatronischer Produkte basiert auf den drei Elementen Problemlösungszyklus auf der

Mikroebene, V-Modell auf der Makroebene sowie vordefinierten Prozessbausteinen für die Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte.

Der Mikrozyklus zur Problemlösung erfolgt analog zum System Engineering. Der Zyklus beschreibt eine systematische Vorgehensweise zur Lösung einzelner Probleme bzw. Teilprobleme bei der Entwicklung. In diesem Zusammenhang werden nicht alle Probleme simultan, sondern nur ein spezifisches Problem bearbeitet. Der Zyklus beginnt mit einer Situationsanalyse bzw. Zielübernahme. Anschließend werden alternative Lösungen während des Analyse- und Syntheseprozesses gesucht. Mit der Identifizierung zusätzlicher Problemstellungen während dieser Phase kann eine neue Zielformulierung bzw. Situationsanalyse einhergehen. Folglich werden die erarbeiteten Lösungen analysiert und evaluiert, um auf dieser Basis einen Lösungsvorschlag für das weitere Vorgehen auszuwählen. Häufig erfordert dies im Anschluss weitere Problemlösungszyklen (vgl. Abbildung 13). Abschließend dient die Bewertung der Ergebnisse bzw. des Prozessablaufs der Optimierung zukünftiger Problemlösungszyklen (VDI 2206).

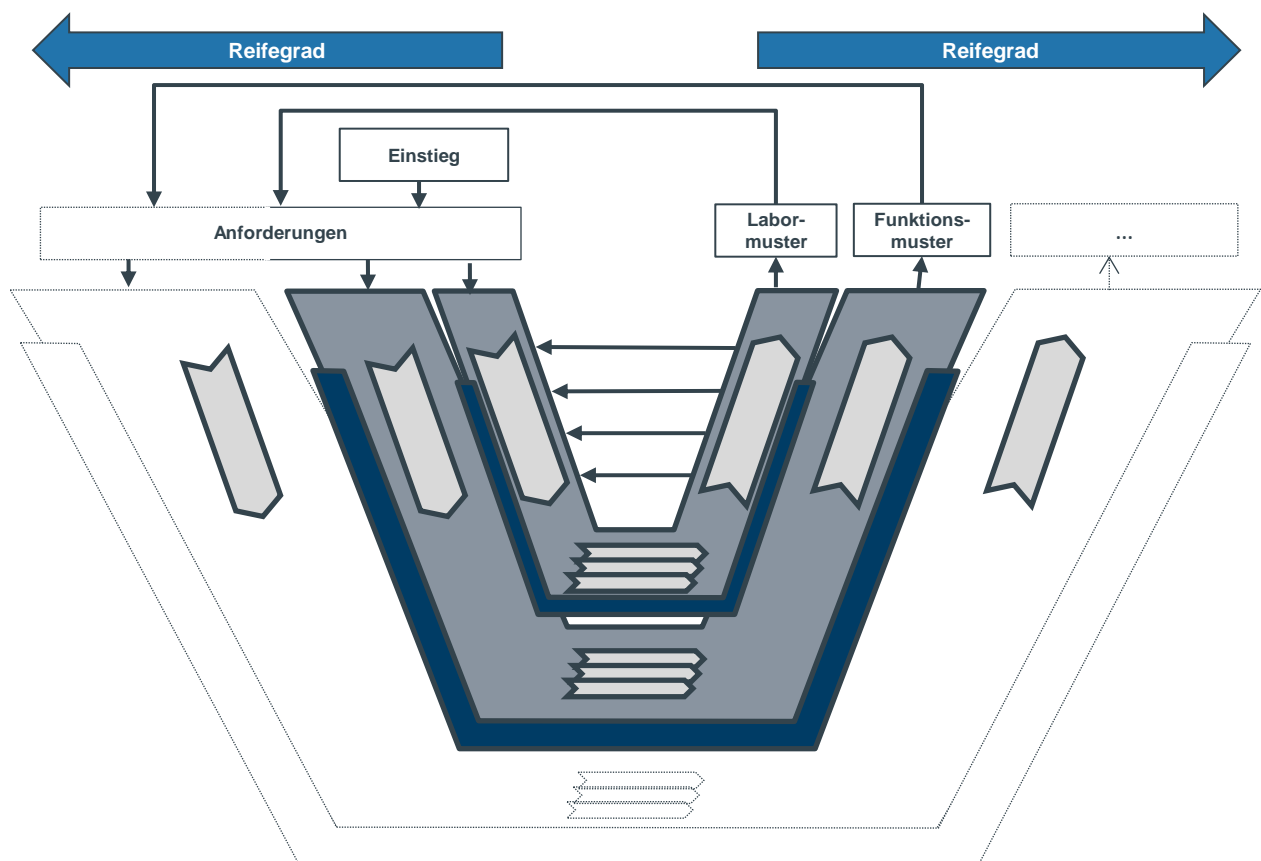


Abbildung 13: Iteratives Vorgehen beim Entwurf von Produktionssystemen für mechatronische Erzeugnisse (VDI 2206, S. 44)

Der Makrozyklus des V-Modells charakterisiert das generische Vorgehen für die Entwicklung mechatronischer Systeme. Basis der Entwicklung bilden die Anforderungen eines Entwicklungsauftrags, die gleichzeitig auch die Kriterien zur späteren Produktbewertung

bilden. Mit dem anschließenden Systementwurf wird ein domänenübergreifendes Lösungskonzept, das die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkzusammenhänge des Produkts beschreibt, definiert. Auf der Grundlage dieses Konzeptes können die einzelnen Domänen, wie Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik, simultan mit der weiteren Detaillierung des Entwurfs beginnen. Ergebnisse dieser parallelen Entwicklungen werden im Rahmen der Systemintegration zusammengeführt. Die Eigenschaften der Ergebnisse der Phasen des Systementwurfs, der domänenspezifischen Entwicklung und der Systemintegration werden mithilfe von Modellen analysiert und mit den Produkthanforderungen abgeglichen (VDI 2206).

Analog zu den Richtlinien VDI 2221 sowie zur VDI 2422 ist auch das V-Modell eine iterative Methodik zur Entwicklung eines Produkts. Jede Iteration liefert eine detailliertere Lösung des Produkts, bis das Produkt bereit für die Serienproduktion ist. Die Anzahl der Iterationen korreliert mit der Produktkomplexität.

Als drittes Element der VDI 2206 kommen vordefinierte Prozessbausteine für wiederkehrende Arbeitsschritte zum Einsatz. Diese Module definieren spezifische Aktivitäten eines Prozesses, die für die Erreichung eines konkreten Prozessziels erforderlich sind. Neben den Aktivitäten enthalten die Prozessbeschreibungen auch Input- und Output-Informationen sowie weitere Informationen, wie beispielsweise die einzusetzenden Methoden und Werkzeuge. Die VDI 2206 definiert die Prozessmodule für den Systementwurf, die Modellbildung und -analyse, den domänenspezifischen Entwurf, die Systemintegration sowie die Eigenschaftsabsicherung (VDI 2206).

Neben der Wiederverwendung von Prozessbausteinen fordert die Richtlinie VDI 2206 auch die Verwendung von Werkzeugen zur Verwaltung von Anforderungen zur Wiederverwendung von Entwicklungsergebnissen. Die Wiederverwendung der Ergebnisse bedingt eine „strukturierte, nachvollziehbare und vollständige Dokumentation der Anforderungen“ (VDI 2206, S. 59) sowie der Einflüsse der Anforderungen auf die Produktgestaltung. Von einer detaillierten Beschreibung der Wiederverwendung wird jedoch abgesehen.

2.5.7 Spezifische Wiederverwendungsmethoden

Neben den klassischen Methoden zum Anlagenengineering bestehen gewerkespezifische Ansätze bzgl. der Wiederverwendungsmethoden. (Schröck 2016) analysierte verschiedenste Anwendungen, u.a. (Maga 2013) (Rottke et al. 2012) (Hady und Wozny

2012) hinsichtlich der Wiederverwendungsmechanismen, Zielzustände sowie der Berücksichtigung der Variabilität. Intention der Mehrheit der Ansätze ist eine systematische Wiederverwendung. In diesem Zusammenhang skizziert (Schröck 2016) ein interdisziplinäres Wiederverwendungskonzept. Weitere interdisziplinäre Lösungsansätze finden sich beispielsweise in (Vogel-Heuser et al. 2015), (Jazdi et al. 2010) und (Weilkiens 2014). Exemplarisch wird an dieser Stelle die Wiederverwendung von Planungskomponenten nach (Döbele 2009) erläutert. Dieser untergliedert sein Vorgehensmodell in einen projektabhängigen und unabhängigen Teil (vgl. Abbildung 14).

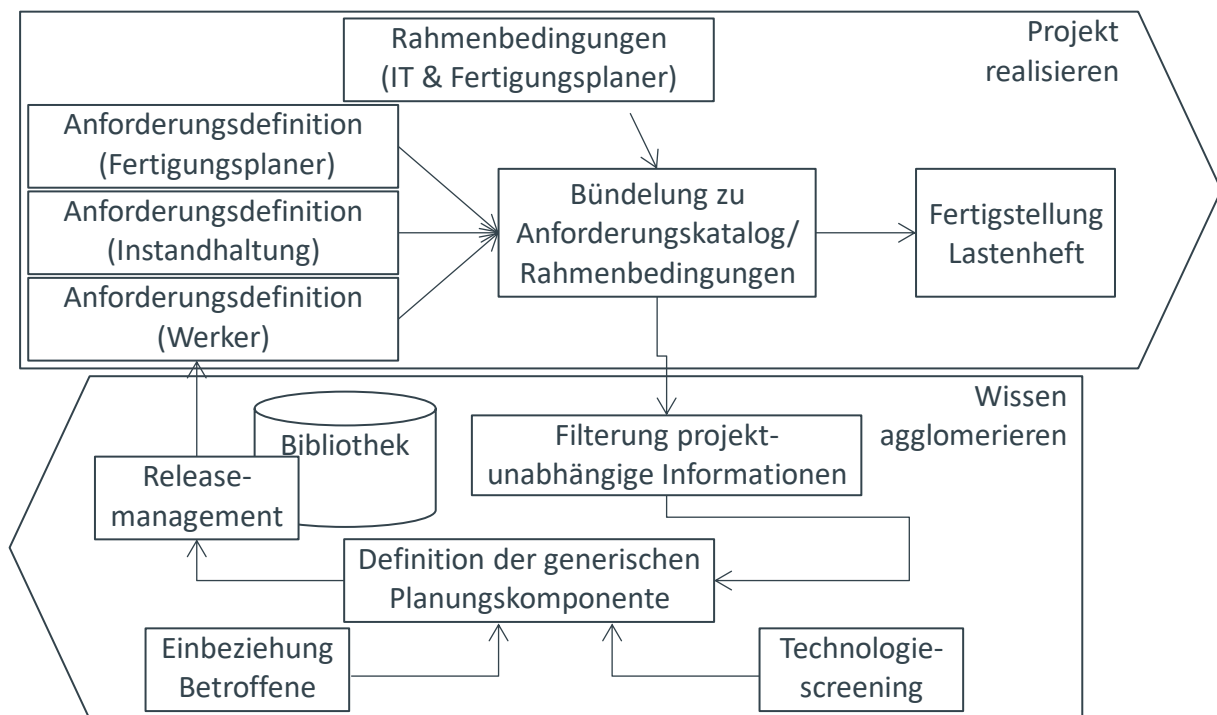


Abbildung 14: Planungsprozess zur Wiederverwendung von Anlagenartefakten (Döbele 2009, S. 424)

Eingangs sind projektunabhängige standardisierte Bausteine zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist eine Betrachtung der Rahmenbedingungen für eine spätere Verwendung essenziell. Die entwickelten Komponenten werden in einer Bibliothek hinterlegt, aus der sich die Projekte speisen. Resultierend können die Komponenten projektunabhängig optimiert werden. Vorteilhaft ist die Reduzierung der Entwicklungsaufwendung je Projekt bei projektübergreifender Komponentennutzung sowie die schnelle Reaktionsfähigkeit auf Änderungen im Anlagelebenszyklus. Dieses Vorgehen bedingt eine unternehmensinterne Standardisierung der Prozesse, Produkte sowie Anlagen, da die Berücksichtigung der Komponentenanforderungen an die Integrationsumgebung für die Wiederverwendung dieser essenziell ist.

2.6 Zusammenfassung der Wiederverwendung im Anlagenengineering

In Bezug auf die Forschungsfragen (vgl. Kap. 1.2) charakterisiert dieses Kapitel den Betrachtungsgegenstand der Anlage im Kontext der Wiederverwendung im Anlagenengineering. Die in dieser Arbeit betrachteten Anlagen sind mechatronische Einheiten innerhalb eines Produktionssystems, welche als Ressourcen zur Ausführung von Produktionsprozessen genutzt werden. In Abhängigkeit von der Zielsetzung bestehen verschiedene Ansätze zur Strukturierung von Anlagen. Für eine ganzheitliche Optimierung sollte der Produktlebenszyklus einer Anlage nicht isoliert, sondern in Kombination mit dem zu fertigenden Erzeugnis und den Anlagenkomponenten, im Sinne des RAMI 4.0, betrachtet werden.

Die Lebenszyklen einer Anlage untergliedern sich in die drei Phasen Entstehung, Nutzung und Rückbau, wobei der Fokus auf der Entstehung liegt. Die Entstehung einer Anlage erstreckt sich von der Auftragserstellung bis zum Hochlauf der Produktion.

Für die Wiederverwendung von Elementen im Anlagenengineering stehen verschiedene Wiederverwendungsansätze zur Verfügung. Die systematische Wiederverwendung verlangt eine einheitliche Produktarchitektur der Anlagen.

In der Automobilindustrie erstellt die Anlagenplanung des OEM's i.d.R. das Anlagenkonzept unter Berücksichtigung der Anforderungen der späteren Stakeholder, wie beispielsweise des fertigenden Werkes oder auch der Instandhaltung (Döbele 2009). Mit der anschließenden Erstellung der Ausschreibungsunterlagen verfolgt die Anlagenplanung die Intention, einen Anlagenbauer zu beauftragen.

Zur Effizienzsteigerung wird im Anlagenengineering auf die Wiederverwendung von Artefakten zurückgegriffen. Diese werden projektunabhängig verwaltet. Im Folgenden sollen die Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering untersucht werden. Dies erfordert eine Betrachtung der Wiederverwendungsmöglichkeiten im Produktlebenszyklus sowie eine anschließende Auswahl der relevanten Anwendungsfälle für das Anlagenengineering. Abbildung 15 visualisiert die Wiederverwendungsmöglichkeiten von Informationen über den Produktlebenszyklus. Im Fokus dieser Arbeit steht die Wiederverwendung von Entwurfselementen im Rahmen der Produktentstehung von Anlagen, die in den Anwendungsfällen 1,2,5, sowie 10 stattfindet.

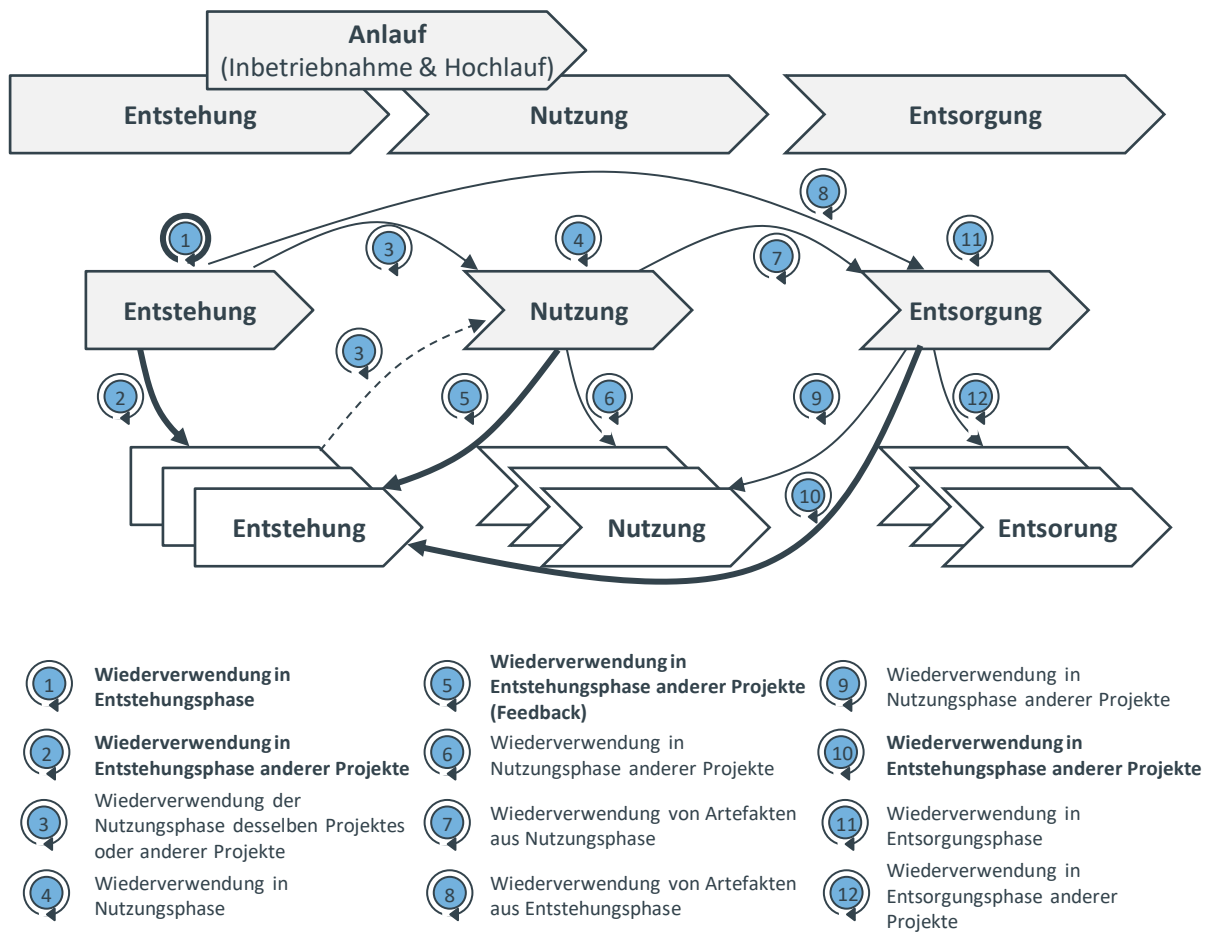


Abbildung 15: Wiederverwendung von physischen und informativen Artefakten im Produktionssystemzyklus (Lüder et al. 2017b, S. 127)

3 Risiken im Anlagenengineering in der Automobilindustrie

In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung der Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering. Eingangs bedingt dies eine nähere Charakterisierung des Risikobegriffs. Nachdem im vorherigen Kapitel (vgl. Kap. 2) die Voraussetzungen für die Ableitung der Risiken geschaffen wurden, erfolgt abschließend deren Klassifizierung.

3.1 Begriffsdefinition Risiko

Obwohl der Begriff Risiko in der Theorie sowie Praxis etabliert ist, weist dieser sowohl inter- also auch intradisziplinär eine ausgeprägte Heterogenität hinsichtlich der Verwendung auf (Wolke 2008) (Mikus 2001) (Proske 2004). Auch der semantische Ursprung des Begriffs ist nicht abschließend geklärt (Kluge und Seebold 2002). Der Risikobegriff findet sich in allen Gebieten des menschlichen Lebens und Handelns wieder (Keitsch 2004). Etymologische Rückschlüsse sind aus dem spanischen, italienischen, lateinischen, arabischen sowie griechischen Sprachgebrauch möglich (vgl. z.B. (Kluge und Seebold 2002) (Wolf 2005) (Scherpereel 2006) (Bernstein 2017) (Winter 2007) (Wasserzieher 1974)). Die geschichtlichen Auffassungen subsumieren das Risiko als eine Gefahr oder auch ein Wagnis, welche bzw. welches mit einer aktiven Wahlentscheidung zwischen Ereignissen einhergeht (Bernstein 2017). Eine Gefahr ist ein Ereignis, welches ein definiertes Merkmal innerhalb eines Systems negativ beeinflussen kann (Eberhardt 2008). Die Gleichsetzung des Risikos mit einer potentialen Gefahr verdeutlichen das spanische Wort *risco* bzw. der lateinische Terminus „*resecum*“, die aus der Seefahrt stammen und das Umschiffen einer gefährlichen Felsklippe umschreiben (Kluge und Seebold 2002) (Scherpereel 2006). Das Risiko im Sinne des Handelsverkehrs fokussiert somit auf die Bewertung der mit dem Geschäft verbundenen Verlustgefahr, die für einen potentiellen Gewinn eingegangen wird (Basler Ausschuss für Bankenaufsicht 2003). Dieser Zusammenhang wurde im vorherigen Beispiel durch die Klippe, welche für den Handel umschiffen werden musste, symbolisiert (Keitsch 2004) (Pechtl 2003). Das Eintreten des Ereignisses ist jedoch im Vorfeld nicht bekannt und unkalkulierbar (Kluge und Seebold 2002).

Neben der asymmetrisch, rein negativ geprägten Auslegung des Begriffs Risiko, kann dieser bei symmetrischer Betrachtung auch positiv verstanden werden. Der frühitalienische Begriff „*risicare*“ mit der Bedeutung von „etwas wagen“ greift diese symmetrische Auslegung des Risikos auf. Ein Handelsgeschäft birgt nicht nur die Möglichkeit, Verluste zu erleiden, sondern unter Umständen auch die Chance eines Gewinns. Folglich gehören Verlust und Gewinn zusammen (Wolf 2005) (Scherpereel 2006) (Bernstein 2017).

Zusammenfassend ist die Auslegung des Begriffs Risiko vom Kontext seiner Verwendung abhängig und es existiert keine umfassende interdisziplinäre Risikodefinition (Waas 2005). Die bestehenden Definitionsansätze lassen sich jedoch in (Kempe 2004) (Schuppisser 1978):

- informationsorientierte,
- entscheidungsorientierte und
- zielorientierte Risikodefinitionen klassifizieren.

Diese werden im Folgenden erörtert, um anschließend eine Risikodefinition im Kontext dieser Abhandlung abzuleiten.

3.1.1 Informationsorientierte Risikodefinition

Im informationsorientierten Ansatz der Risikodefinition wird der Risikobegriff auf Grundlage eines unvollkommenen Informationszustandes für eine Entscheidungssituation und damit ursachenbezogen charakterisiert (Schuppisser 1978). Es wird kein Bezug zur möglichen Wirkung von Risiken hergestellt (Brünger 2011). Das informationsorientierte Risikoverständnis definiert (Knight 1964) das Risiko als Zustand messbarer Unsicherheit, welcher auch als versicherbare Verlustgefahr zu deuten ist (Knight 1964). Sowohl Auftretenswahrscheinlichkeit als auch die potentiellen Folgen dieses Verlustes liegen vor und lassen sich durch objektive Daten charakterisieren (Knight 1964). Das Risiko stellt somit eine intersubjektive, nachprüfbare Wahrscheinlichkeitsverteilung der zukünftigen Ereignisse dar (Lück 2000). Hierzu zählen beispielsweise logische Wahrscheinlichkeitsverteilungen nach Laplace, wie z.B. Münzwürfe, deren Ereigniskombination deduktiv ermittelt werden kann. Darüber hinaus beinhalten die objektiven Wahrscheinlichkeiten auch statistische Wahrscheinlichkeiten (Vetter 1967).

Im Deutschen wird dieses Risikokonzept häufig durch die Begrifflichkeiten Gewissheit, Ungewissheit sowie Unsicherheit beschrieben (Fiege 2006) (Wöhe und Döring 2002) (Bauch 1994). „Je nach der Auffassung, wie sich innerhalb des Kontinuums zwischen vollkommener Information (Gewissheit) und total unvollkommener Information (Ignoranz) die Informationszustände in Unterkategorien einteilen lassen, wird der Risikobegriff definiert“ (Schuppisser 1978, S. 63). In einer Entscheidungssituation innerhalb eines vollkommenen Informationssystems sind dem Entscheider alle möglichen Zustände sowie deren Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt. Die Entscheidung wird mit Gewissheit vollständiger Sicherheit getroffen. Ist das Informationssystem hingegen unvollkommen, handelt es sich um eine ungewisse Entscheidung (Wöhe und Döring 2002).

Innerhalb eines vollkommenen Informationssystems, welches alle relevanten Informationen über zukünftige Ereignisse enthält, existiert kein Risiko, da die Handlungen bereits definiert sind (Gottwald 1990).

Eine risikobehaftete Entscheidungssituation, d.h. die messbare Ungewissheit, liegt vor, wenn der Entscheidungsraum durch die möglichen Ereignisse sowie deren Folgen definiert ist und objektive Daten durch mathematische Auftretenswahrscheinlichkeit vorliegen (Kupsch 1973) (Zuber 2009). Die Begriffe Risiko und Ungewissheit sind nicht synonym zu verwenden, vielmehr ist die Ungewissheit die Voraussetzung für die Entstehung von Risiken, denn „Risiko ist durch unvollkommene Information hervorgerufen“ (Wittmann 1959, S. 55) (Wossidlo 1970) (Fiege 2006) (Bitz 2000).

Hingegen kennzeichnet eine Entscheidung unter Ungewissheit eine Situation, die bedingt durch ihre Einmaligkeit über keinerlei Referenzen verfügt sowie einen unvollständig definierten Entscheidungsraum beinhaltet (Knight 1964). Typisch für eine Situation unter Unsicherheit ist der geringe Informationsgrad (Maier 2007) (Helten 1994). Der Entscheider kann in dieser Situation nur auf Grundlage von subjektiven Wahrscheinlichkeiten entscheiden (Knight 1964). Diese basieren auf Expertenwissen sowie der Neigung des entscheidenden Individuums und weisen somit keine intersubjektive Nachprüfbarkeit auf (Gottwald 1990) (vgl. Abbildung 16).

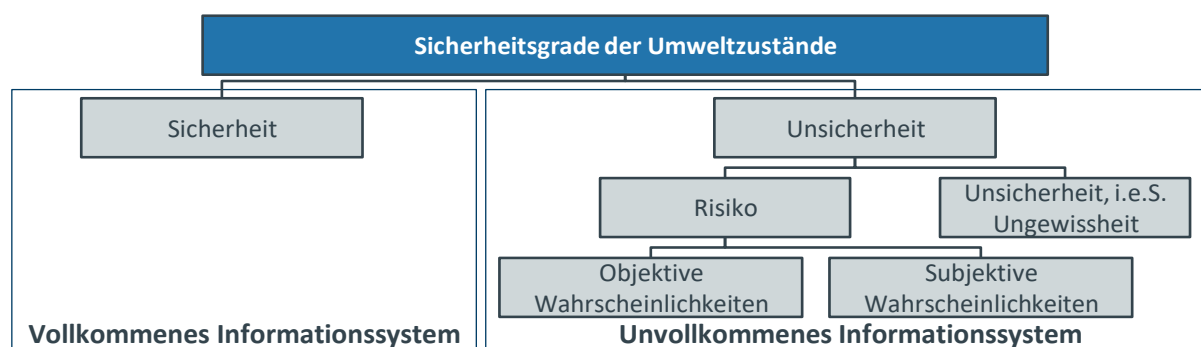


Abbildung 16: Risiko im engeren / weiteren Sinn (Wöhe und Döring 2002, S. 122)

Eine eindeutige Trennung objektiver und subjektiver Wahrscheinlichkeit ist in der Praxis nicht immer gegeben (Kupsch 1973). Beispielsweise beinhalten auch deterministische Daten aus Erhebungen subjektive Komponenten wie Wahrnehmungsverzerrungen (Kupsch 1973). Weiterhin ist der Anteil objektiver Wahrscheinlichkeiten für spezifische Situationen i.d.R. gering (Wossidlo 1970) (Starp 2005). Folglich werden häufig auch subjektive Wahrscheinlichkeiten zum Risikobegriff gezählt (Brünger 2011). Für eine Differenzierung werden Risiken, die mit objektiven Wahrscheinlichkeiten messbar und quantifiziert sind, auch als Risiken im engeren Sinne bezeichnet (Wöhe und Döring 2002) (Maier 2007).

3.1.2 Entscheidungsorientierte Risikodefinition

Im entscheidungstheoretischen Zusammenhang werden Risiken ursachenbezogen betrachtet. In diesem Kontext resultieren Risiken aus unvollständigen Informationen während einer Entscheidung (Helten 1994) und beinhalten somit die Möglichkeit des Eintretens einer Fehlentscheidung bei der Auswahl zwischen Handlungsalternativen.

Die Vertreter des entscheidungsorientierten Ansatzes differenzieren nicht zwischen Unsicherheit und Ungewissheit (Wittmann 1959), jedoch interpretieren sie die Möglichkeiten der Fehlentscheidung dennoch uneinheitlich (Kupsch 1973).

Einerseits kann eine Entscheidung als fehlerhaft charakterisiert werden, wenn sich nachträglich eine andere Alternative als vorteilhafter herausstellt (Wittmann 1959) (Brünger 2011). Nach (Kupsch 1973) korreliert die Höhe des Risikos mit der Korrigierbarkeit der Fehlentscheidung. Die irreversiblen Kosten durch Fehlentscheidung steigen mit der Dauer, in der eine Fehlentscheidung nicht korrigiert wird. Entsprechend dieser Auffassung enthält das Risiko somit auch eine Zeitkomponente (Kupsch 1973).

Andererseits können auch Entscheidungen, welche ein gegebenes Ziel verfehlen, als fehlerhaft klassifiziert werden. Hierbei gilt es zu berücksichtigen, dass teilweise zum Zeitpunkt der Entscheidung keine besseren Entscheidungen getroffen werden können, diese aber trotzdem nicht zielführend sind. So unterliegt auch die Zieldefinition durch subjektive Einflüsse der Möglichkeit einer Fehlplanung (Brünger 2011).

Weiterhin gestaltet sich eine Differenzierung dieser Auslegungen zu den zielorientierten Risikodefinitionen schwierig (Schuppisser 1978).

Zusammenfassend ergeben sich Risiken im unternehmerischen Umfeld durch die mangelnde Beherrschbarkeit zukünftiger Ereignisse. Risiken resultieren aus unvollkommenen Informationssystemen, weshalb nicht alle alternativen Szenarien in der Planung berücksichtigt werden können (Lange und Wall 2001) (Fiege 2006) (AS/NZS 4360). Folglich ergibt sich mit den entscheidungsorientierten Risikodefinitionen ein Messbarkeitsproblem, da Fehlentscheidungen erst später ermittelt werden können (Lange und Wall 2001). Bedingt durch die Überlappung von Entscheidungen sind kausale Verknüpfungen von Zielabweichungen und Fehlentscheidungen in der Regel nicht möglich (Brünger 2011).

3.1.3 Zielorientierte Risikodefinition

Zielorientierte Risikodefinitionen ergänzen die ursachenbezogenen Risikodefinitionen, da sie nicht auf die Risikoursachen, sondern auf deren Folgen fokussieren (Kupsch 1973) (Braun 1984) (Lück 2000). Das wirkbezogene Risiko beinhaltet folglich den Effekt des

realisierten Risikos in Form von Ziel- und Planabweichungen (Helten 1994) (Braun 1984) (Hölscher 2002). Resultierend bildet die Zieldefinition bei der Gegenüberstellung mit dem Ergebnis die Voraussetzung für die Existenz eines Risikos (Braun 1984).

Bezüglich der Zielabweichung des Risikos bestehen zwei mögliche Interpretationen (Braun 1984). Im Sprachgebrauch und in der betriebswirtschaftlichen Praxis wird häufig der ausfallorientierte Risikobegriff verwendet, der lediglich die negativen Abweichungen von einer Zielgröße berücksichtigt (Rommelfanger 2008) (Wördenweber und Wickord 2001). Für diese einseitige bzw. asymmetrische Betrachtung von Zielverfehlungen wird der Begriff Risiko im engeren Sinne verwendet (Braun 1984) (Scherpereel 2006). Auslöser dieser negativen Zielabweichungen können Störeinflüsse auf ein System sein. Im Falle eines Unternehmens lässt sich dieses Risiko als Gefahr der ökonomischen Wirkung in Form von Verlustgefahr darstellen (Brühwiler 2007). Bei einer Übertragung dieser Interpretation auf Projektrisiken äußern sich Ausprägungen von Abweichungen in Dauer, Budget und Qualität (Königs 2013).

Das Risiko im weiteren Sinne berücksichtigt die Mehrwertigkeit von Abweichungen von den zuvor getroffenen Annahmen. Hinausgehend über die negativen Zielabweichungen subsumiert das Risiko im weiteren Sinn somit auch positive Zielabweichungen, die Chancen (Braun 1984) (Harrant und Hemmrich 2004). Häufig wird das Risiko im weiteren Sinn auch als symmetrischer Risikobegriff, wie z.B. in der Kapitalmarkttheorie, verwendet. Hier charakterisiert das Risiko die Streuung einer Größe mit negativer wie auch positiver Abweichung von einem Referenzwert (Scherpereel 2006). Folglich ist das Risiko die „Möglichkeit, dass sich explizit genannte oder implizit vorausgesetzte Ziele und Erwartungen eines Unternehmens, eines Unternehmensteils (Geschäftsbereich, Funktionsbereich) oder eines einzelnen Entscheiders aufgrund von Störprozessen nicht erfüllen, sofern die mögliche Abweichung von den angestrebten Zielen bzw. vom Erwartungswert negativ (ungünstig) ist. Positive Abweichungen werden dagegen als Chancen bezeichnet“ (Ackermann 1999, S. 48).

Nach (DIN ISO 31000) ist das Risiko als Effekt der Unsicherheit auf die Ziele einer Unternehmung definiert. Folgende zentrale Elemente werden dabei wie folgt erläutert (DIN ISO 31000):

- **Effekt:** Positive oder negative Abweichung von einem erwarteten Sollzustand,
- **Unsicherheit:** Zustand eines teilweisen oder vollkommenden Fehlens von Informationen bzgl. eines potentiellen Risikoereignisses und

- **Ziele:** Verschiedenste Bestrebungen, die bspw. finanzielle, technische und rechtliche Aspekte beinhalten und sich auf ein gesamtes Unternehmen, einzelne Strategien, Projekte, Produkte oder Prozesse beziehen.

Im Fokus der wirkungsbezogenen Risikodefinitionen steht die Wirkung, die sich durch das Risiko ergibt (Lück 2000). Bedingt durch die unterschiedlichen Forschungsschwerpunkte existiert eine Vielzahl wirkbezogener Risikodefinitionen. Prinzipiell kann für jede Zielabweichung eine spezifische Risikodefinition abgeleitet werden. Die Varianz der Definitionen für die Ziele verschiedener Systeme aus unterschiedlichen Perspektiven führt zwangsläufig zu unterschiedlichen Charakteristika des Risikos (Braun 1984) (Wolf 2005). Spezifische Definitionsansätze des Risikos eignen sich jedoch nur bedingt, um interdependente Einflussfaktoren und reale Risikosituationen abzubilden (Kupsch 1973).

3.1.4 Risikodefinition im Kontext des Anlagenengineerings

Auf Basis der allgemeinen Risikodefinitionen erfolgt eine anwendungsfallspezifizierte Risikodefinition, da für diese der Kontext der Verwendung essenziell ist (Wolf 2005). Die Herleitung der Definition erfolgt am Beispiel der Komponentenauswahl für Greifer im Anlagenengineering (vgl. Abbildung 17).

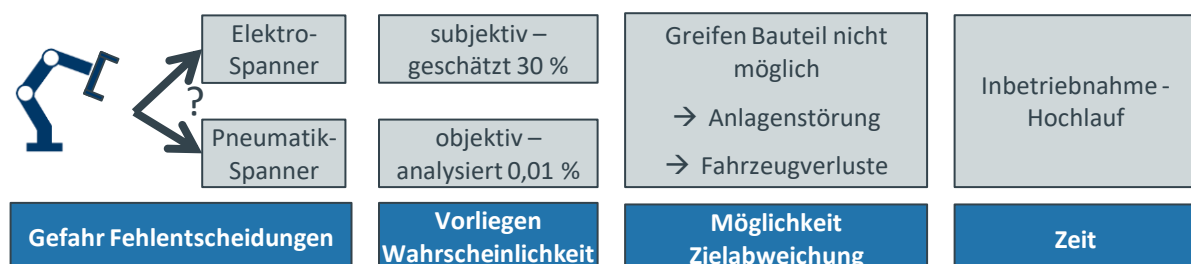


Abbildung 17: Herleitung Risikodefinition

Kernkomponenten der vorherigen Risikodefinitionen, welche im Folgenden Anwendung finden, sind in Anlehnung an (Brünger 2011):

- Die **Gefahr von Fehlentscheidungen:** Die Risiken werden im unternehmerischen Umfeld, einem unvollkommenen Informationssystem, in dem der Eintritt zukünftiger Ereignisse offen ist, definiert (Knight 1964) (Wöhe und Döring 2002). Bezogen auf das Beispiel entsteht diese Situation bei der Auswahl eines Spanners für das Greifmittel.
- Das **Vorliegen von Wahrscheinlichkeiten:** Für die Bestimmung der Höhe des Risikos müssen objektive bzw. subjektive Eintrittswahrscheinlichkeiten für mögliche Ereignisse vorliegen (Wöhe und Döring 2002). Im Fallbeispiel ist der

Pneumatik-Spanner bereits erprobt und es liegen Auswertungen der letzten Anläufe vor. Der Elektro-Spanner ist ein Ersteinsetzer. Folglich sind die Wahrscheinlichkeiten geschätzt.

- Die **Möglichkeit von Zielabweichungen**: Intention dieser Arbeit ist es, ausschließlich negative Abweichungen im Anlagenengineering aufzudecken. Basis der nachfolgenden Betrachtungen bildet somit die Definition des Risikos im engeren Sinne (Keitsch 2004) (Braun 1984). Im Fallbeispiel führt ein fehlerhafter Spanner zu Anlagenstörungen und in deren Folge zu Fahrzeug-Verlusten.
- Die **Zeit**: Risiko gilt immer nur für einen bestimmten Zeitpunkt bzw. Zeitraum, in dem die Zielabweichungen betrachtet werden (Siepermann 2008). Im Greiferbeispiel wirkt das Risiko erst ab der Inbetriebnahme und anschließend bis zum Hochlauf der Produktion.

Auf dieser Basis gilt für die vorliegende Arbeit in Anlehnung an (Brühwiler 2001, S. 10) folgende Risikodefinition:

„Ein Risiko ist eine nach Häufigkeit (Eintrittserwartung) und Auswirkung bewertete und konkrete Bedrohung eines zielorientierten Systems“, die auf unzureichenden Informationen der Entscheidungsträger fußt. „Das Risiko betrachtet stets die negative, unerwünschte und ungeplante Abweichung von den Systemzielen und deren Folgen“ in einem definierten Zeitraum.

3.2 Risikoklassifizierung im Anlagenengineering

Innerhalb eines holistischen Risikomanagementsystems eines Unternehmens ist die Berücksichtigung (vgl. Kap. 4) möglichst aller relevanten Risiken erforderlich. Folglich bildet die Klassifizierung der Einzelrisiken die Grundlage der weiteren Betrachtungen. Analog zur Risikodefinition ist auch die Risikoklassifizierung sowohl anwendungsfallbezogen als auch anwendungsfallübergreifend heterogen (Scherpereel 2006) (Kaack 2012) (Voigt 2010). Für die Abgrenzung der Risiken im Anlagenengineering erfolgt sowohl eine ursachen- als auch wirkbezogene Kategorisierung.

Die Risiken für ein System sind ursachenbezogen in interne sowie externe Risiken zu kategorisieren. Während externe Risiken ihren Ursprung außerhalb des Systems haben, liegen die Ursachen interner Risiken innerhalb des Systems. In diesem Anwendungsfall stellt das produzierende Unternehmen das Zielsystem dar. Folglich sind interne Risiken im Gegensatz zu externen Risiken i.d.R. beeinflussbar (Wolke 2008) (Eilenberger et al.

2013). Nach (Keitsch 2004, S. 11) sind hierbei folgende Risikokategorien zu berücksichtigen:

- **Risiken „höherer Gewalt“** umfassen alle externen Ereignisse, die sich nicht durch das Unternehmen beeinflussen lassen, jedoch erhebliche Folgen für das Unternehmen haben können. Die Auswirkungen können lediglich durch geeignete Maßnahmen reduziert werden. Hierzu zählen beispielsweise Epidemien oder auch Naturkatastrophen (Keitsch 2004) (Wolke 2008).
- **Politische und ökonomische Risiken** auf ein Unternehmen resultieren aus Veränderungen der Umwelt des Unternehmens. Politische Risiken sind ausschließlich durch die hoheitliche Einflussnahme des Staates, in dem sich das Unternehmen bzw. ein Vertragspartner befindet, bedingt. Diese Länderrisiken können sowohl im In- als auch Ausland auftreten. Veränderte Käuferbedürfnisse sowie neue langfristige Trends können sich ebenso negativ auf das Unternehmen auswirken. Aufgrund externer Ursachen lassen sich diese Risiken nur bedingt direkt durch das Unternehmen beeinflussen (Keitsch 2004).
- **Unternehmensrisiken** subsumieren im Gegensatz zu den vorherigen Kategorien alle Risiken auf das Unternehmen, die durch dieses selbst beeinflusst werden können (Keitsch 2004) (Wolke 2008). Diese Risikokategorie bildet die Basis für die weitere Klassifizierung der Risiken im Anlagenengineering.

Unternehmensrisiken können nach verschiedenen Kriterien klassifiziert werden (Keitsch 2004) (Wolke 2008) (Wiedemann 1998). Generell ist zwischen allgemeinen Unternehmensrisiken, die unternehmensweit wirken, sowie Projektrisiken, welche durch den Prozess der Leistungserstellung induziert werden, zu differenzieren (Voigt 2010). Bedingt durch die Interdependenzen zwischen den Risiken ist eine eindeutige Trennung nicht immer möglich (vgl. Abbildung 18).

Zusätzlich differenzieren (Wolke 2008) und (Wiedemann 1998) zwischen leistungs- sowie finanzwirtschaftlichen Risiken bzw. finanziellen und betrieblichen Risiken. Finanzwirtschaftliche Risiken bilden beispielsweise Marktpreisrisiken, Geschäftspartnerausfälle oder auch Liquiditätsrisiken ab. Von einer detaillierten Betrachtung dieser Risiken wird aufgrund der mangelnden Beeinflussbarkeit durch das Anlagenengineering abgesehen. Die leistungswirtschaftlichen Risiken untergliedern sich wiederum in Betriebs- sowie Absatzrisiken (Wolke 2008). Teilweise werden Absatz- bzw. Markterfolgsrisiken sowie betriebliche Risiken auch auf einer Ebene mit den finanzwirtschaftlichen Risiken eingeordnet (Rolfes und Kirmße 2000) (Wiedemann 1998) (Keitsch 2004).

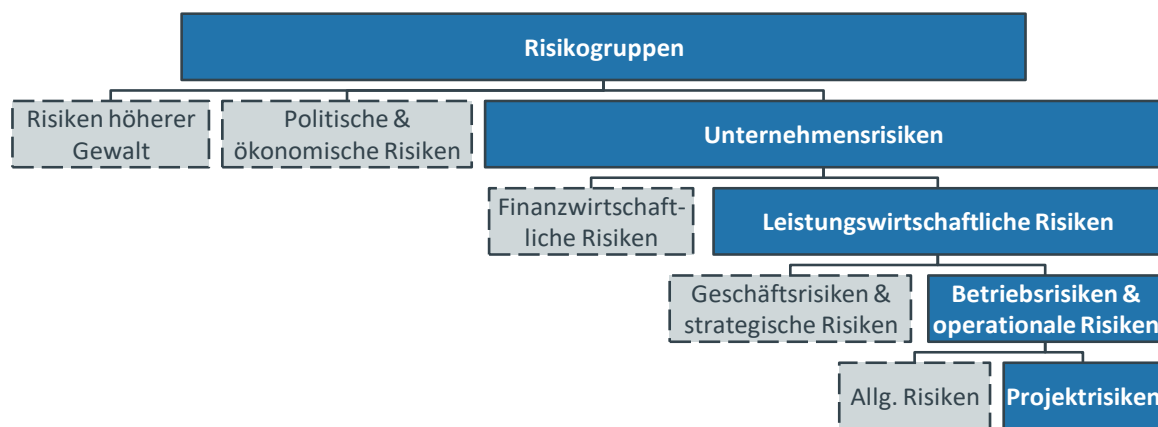


Abbildung 18: Risikogruppen eines Unternehmens (Wolke 2008) (Keitsch 2004) (Wittmann 2006) (Wiedemann 1998) (Romeike 2003c)

Strategische Risiken werden auch als Geschäftsrisiken bezeichnet und subsumieren das Risiko, dass die mit einer Investition realisierbaren Erträge vom definierten Referenzwert abweichen (Rolfes und Kirmße 2000). Folglich ergeben sich strategische Risiken aus der Unternehmensstrategie bzw. strategischen Zielen (Keitsch 2004) und wirken auf die mittel- bis langfristige Zukunft des Unternehmens.

Hingegen umfassen operative Risiken, die auch als betriebliche Risiken bezeichnet werden, „alle Formen der zeitlichen, qualitativen oder mengenmäßigen Verschlechterung der Leistungserstellung“ (Gebhardt und Mansch 2001, S. 25). Sie resultieren beispielsweise aus der Beschaffung sowie der Kombinatorik der Produktionsfaktoren innerhalb des Produktionsprozesses (Rolfes und Kirmße 2000) und umfassen kurz- bis mittelfristige Störungen der Leistungserstellung (Voigt 2010). Das Produktionsrisiko subsumiert folglich alle Risiken, welche einen negativen Einfluss auf den Produktionsprozess innerhalb eines Produktionssystems ausüben. Negative Einflüsse umfassen alle Störungen, die zu Abweichungen vom definierten Produktionsziel bzgl. der Qualitäts- als auch der Volumenmerkmale eines Produkts führen (König 2008). Entsprechend dieser Auffassung gliedern sich Risikoursachen nach Personen, Prozessen sowie Systemen (Wolke 2008) (Wiedemann 1998). Den operativen Risiken sind neben den allgemeinen Unternehmensrisiken auch die Projektrisiken zuzuordnen (Voigt 2010).

Im Fokus dieser Arbeit stehen die mit dem Anlagenengineering verbundenen Risiken aus Sicht der Produktion in der Automobilindustrie. Analog zu den Projektrisiken werden lediglich interne Projektrisiken, die im direkten Einflussbereich des Anlagenengineerings liegen, betrachtet. Die nicht beeinflussbaren Risikogruppen durch Umwelteinflüsse, wie z.B. höhere Gewalt sowie die politisch-rechtliche Lage und die im Projekt beteiligten Akteure, wie beispielsweise Lieferanten oder Finanzinstitutionen, werden nicht evaluiert (Voigt 2010). Das Anlagenrisiko in dieser Arbeit umfasst somit die operativen Risiken

eines Unternehmens, welche im direkten Zusammenhang mit dem Anlagenengineering stehen. Folglich subsumiert es alle Risiken, die sich innerhalb eines Planungsprojektes für ein betrachtetes Anlagensystem ergeben bzw. direkt von Elementen innerhalb des Arbeitssystems der Anlage ausgelöst werden. Anlagenbedingte Störungen des Produktionsprozesses werden den technischen Risiken zugeordnet (Hoffmann und Neumann 2011).

Technische Risiken sind i.d.R. auf die unzureichenden Kenntnisse bzw. Erfahrungen mit einer Technologie zurückzuführen. Mit fortschreitender Reife innerhalb der Technologielebensphasen nehmen die technischen Risiken ab. Gleichzeitig sinkt jedoch auch das Wettbewerbspotential der Technologie (Westkämper und Balve 2003). Für die betrachteten technischen Risiken im Anlagenengineering ist davon auszugehen, dass prinzipiell bis zu einer erforschten technologischen Fortschrittsgrenze jede Anlage realisierbar ist (Hänggi 1996) (Eckert 1985). Folglich können technische Risiken im Projekt bei hinreichend großen Kosten-, Zeit- und auch Kapazitätsbudgets eliminiert werden. I.d.R. ist dies für ein Anlagenprojekt ökonomisch jedoch nicht realisierbar. Technische Risiken resultieren somit aus den Rahmenbedingungen eines Projektes (Eckert 1985). Die Ursache der betrachteten Risiken bildet somit eine Entscheidungssituation im Anlagenengineering in einem unvollkommenen Informationssystem (vgl. Kap. 3.1.4).

Neben der ursachenbezogenen Klassifizierung von Risiken ist auch eine wirkbezogene Klassifizierung der aus den Ursachen resultierenden Risiken für den Anlagenbetreiber in Bezug auf die Anlage zielführend. Die technischen Risiken im Anlagenengineering wirken in Abhängigkeit vom Zeitverlauf in der Planungs- und Realisierungsphase und/ oder in der Betriebsphase (vgl. Abbildung 6). In Abhängigkeit vom Fortschritt im Produktentstehungsprozess eines Fahrzeugprojektes können sich aus einer Fehlerursache verschiedene Fehlerfolgen ergeben (vgl. Kap. 3.1.4). Die einzelnen Risikogruppen stehen i.d.R. in einem kausalen Zusammenhang und beeinflussen sich gegenseitig. Vor der Inbetriebnahme verursachen die technischen Risiken Modifikationen der Anlage und äußern sich hinsichtlich des Projektes in Qualitäts-, Termin-, Kapazitäts- und Kostenrisiken und beeinflussen die Betriebsphase i.d.R. nicht. Aus technischen Risiken, die erst während der Inbetriebnahme identifiziert werden, resultieren Qualitätsrisiken der Anlage, die sich im Fertigungsprodukt und dem -prozess wiederfinden. Realisiert die Anlage nicht den gewünschten Fertigungsprozess in Menge, Qualität und Zeit, führt dies i.d.R. zu einer reduzierten Ausbringung des Fertigungsprozesses. Zusätzlich müssen ggf. die gefertigten Produkte nachgearbeitet werden oder es entsteht Ausschuss. Auch die

Arbeitssicherheit für das Fertigungspersonal kann durch den technischen Mangel negativ beeinflusst werden. Diese Folgen wirken wiederum direkt auf das Projekt, es kommt i.d.R. zu außerplanmäßiger Anlaufbegleitung und Anpassungen der Anlage zur Beseitigung der Mängel. Weiterhin existieren noch sonstige Risikofolgen, wie z.B. Mitarbeitermotivation, die nicht direkt auf den wirtschaftlichen Projekterfolg wirken (Voigt 2010). Diese werden im Rahmen der Arbeit nicht betrachtet.

Neben diesen für den Anlagenbetreiber betriebsinternen Risiken können aus technischen Risiken durch die gefertigten Produkte auch betriebsexterne Risiken für den Fahrzeug-Endkunden hervorgehen. Gemeinsam ist den betriebsinternen sowie -externen Risiken, dass es sich in jedem Fall um die Möglichkeit einer Zielverfehlung, wie z.B. das Nichterreichen der Kammlinie innerhalb einer vorgegebenen Zeit, handelt. Der Eintritt der Ereignisse unterliegt Wahrscheinlichkeiten (vgl. Kap. 3.1.4).

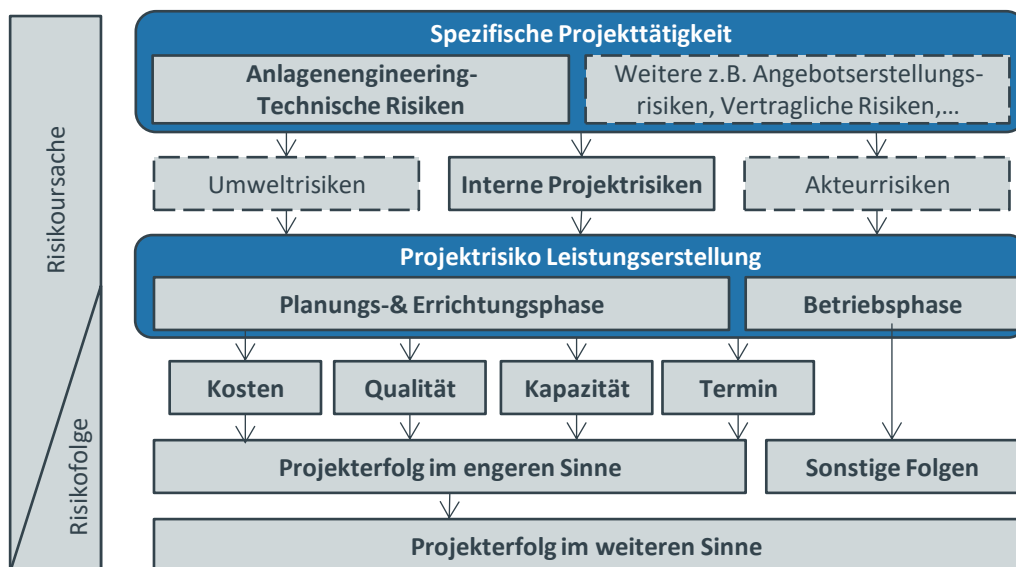


Abbildung 19: Risikomodell im Anlagenengineering (Gutmannsthal-Krizanits 1994, S. 248)

Resultierend ergibt sich für die betrachteten Umfänge des Anlagenengineerings das in Abbildung 19 dargestellte Risikomodell. Dieses bildet die Verkettung von Risikoursachen sowie –folgen in einem Flussmodell ab. Die Kausalitätsbetrachtung für technische Risiken endet in dieser Arbeit mit den Risikofolgen für das Produkt, den Prozess sowie das Fahrzeugprojekt. Weiterführende Risikofolgen, wie z.B. die aus einer mangelnden Anlagenverfügbarkeit induzierte verspätete Einführung eines zu fertigenden Produkts, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht erörtert.

3.3 Zusammenfassung

Dieses Kapitel ergänzt den Betrachtungsgegenstand des Anlagenengineerings (vgl. Kap. 2) um die damit einhergehenden Risiken, da im Rahmen des Anlagenengineerings besteht die Gefahr von Fehlentscheidungen. Der Eintritt zukünftiger Ereignisse ist offen. Die Methodenanforderungen zur Risikobeurteilung im Sinne der Forschungsfragen (vgl. Kap. 1.2) sind damit abschließend spezifiziert. Es werden im Folgenden ausschließlich die Risiken betrachtet, die durch das Anlagenengineering induziert werden sowie beeinflussbar sind. Infolge der durch die technischen Risiken entstehenden Abweichungen kann es zu Verfehlungen bezüglich der Zielvorgaben des Anlagenengineerings kommen. Aus der Kombinatorik der Wahrscheinlichkeit dieser Ereignisse, die sich aus objektiven und subjektiven Wahrscheinlichkeiten ableiten lassen, sowie der potentiell resultierenden Folgen der Zielabweichungen lässt sich das Risiko für einen bestimmten Zeitraum bestimmen (vgl. Kap. 3.1.4).

Die Folgen der Zielabweichungen aus der Anlage können im Sinne des PPR-Systems (vgl. Kap. 2.1.1) das Produkt und den Fertigungsprozess sowie daraus resultierend auch das Projekt betreffen (vgl. Abbildung 20). Neben den wirkbezogenen betriebsinternen Risiken gehen mit der Nutzung der Anlage durch das zu fertigende Produkt auch betriebsexterne Risiken einher. Sowohl die betriebsinternen als auch die -externen Risiken wirken auf das Anlagenprojekt durch die Dimensionen Kosten, Zeit, Qualität sowie Kapazität. Zur eindeutigen Differenzierung der Risikoklassen wird folgende Notation verwendet:

- Qualitative Risikoklassen erhalten kein Kürzel, quantitative Bewertungen des Projektes erhalten zusätzlich das Kürzel „**P**“,
- Aggregierte Risiken erhalten zusätzlich das Kürzel „**GR**“,
- Risikoklassen erhalten das Kürzel „**R**“ sowie eine **fortlaufende Nummer** und
- Projektbewertungen werden durch einen Bindestrich sowie das Kürzel „**K**“ für monetäre Bewertungen sowie „**Z**“ für zeitliche Beurteilungen differenziert.

Resultierend ergibt sich beispielsweise für „Nachträgliche Anlagenanpassungen“ aus monetärer Sicht für das Projekt die Notation PR1-K. Für den Umgang mit diesen Risiken findet das Risikomanagement mit dem Risikomanagementprozess und den zugehörigen Methoden Anwendung. Dieses wird im folgenden Kapitel näher betrachtet.

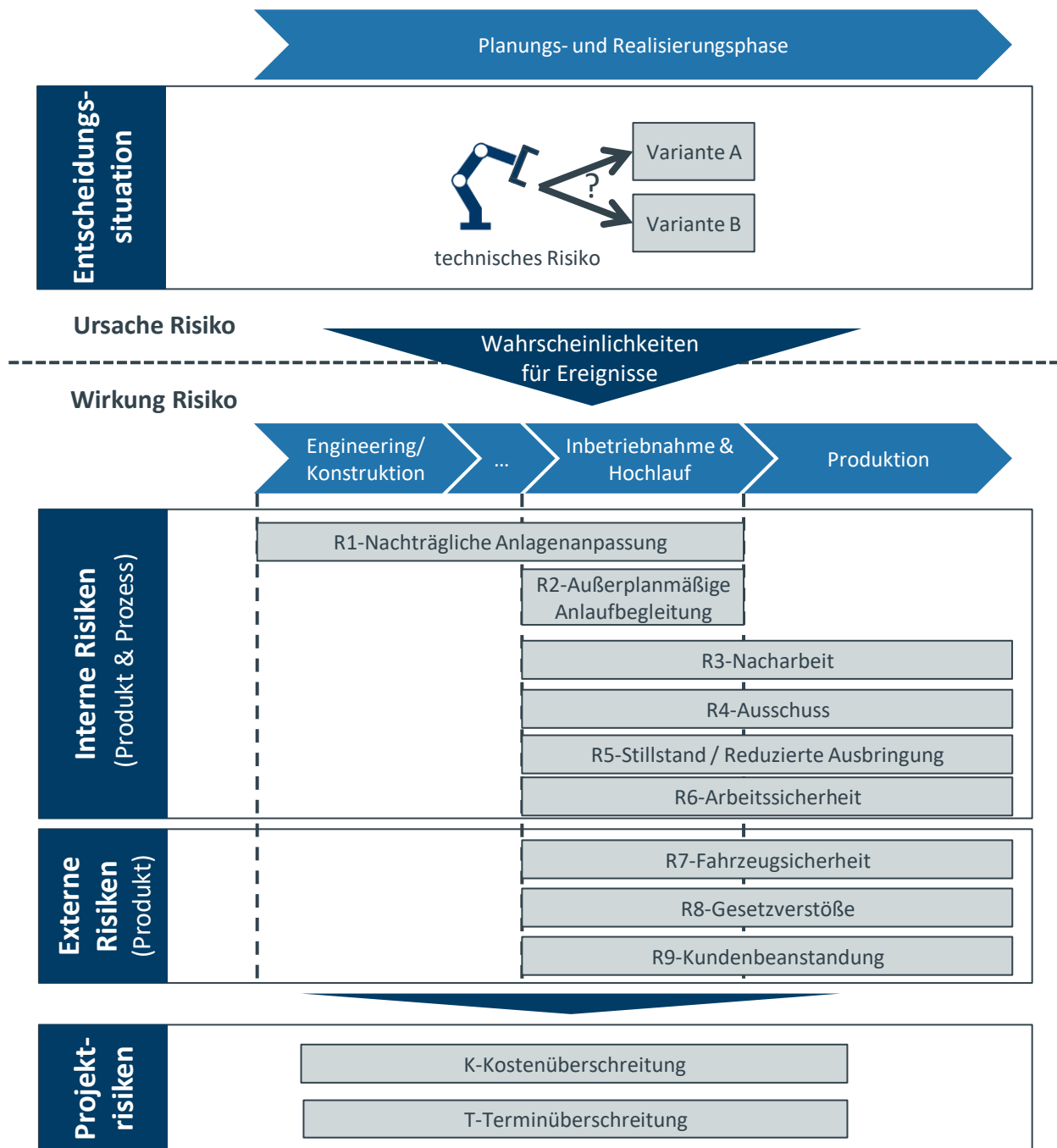


Abbildung 20: Risiken im Anlagenengineering

4 Risikomanagement im Anlagenengineering

Zur Differenzierung von anderen Unternehmensfunktionen erfolgt eine Erläuterung des Stands der Technik des Risikomanagements im Anlagenengineering. In diesem Zusammenhang wird der Risikomanagementprozess dargestellt. Anschließend werden eine Übersicht der in den Teilprozessen des Risikomanagements anwendbaren Methoden gegeben und verschiedene Ansätze zur Wiederverwendung von Risikobeurteilungen aufgezeigt. Eine detaillierte Methodenbeschreibung findet im Anschluss an die Methodenauswahl in Kapitel 5 statt.

4.1 Risikomanagementprozess

Intention des Risikomanagements ist die systematische Handhabung von Risiken. Im Rahmen einer holistischen Unternehmensführung betrachten integrative Ansätze des Risikomanagements hierbei das gesamte Unternehmen. Eine isolierte Minimierung von Einzelrisiken ist i.d.R. nicht zielführend, da mit den erforderlichen Aufwendungen eine Steigerung des gesamtunternehmerischen Risikos einhergehen kann. Der Fokus liegt nicht in der Eliminierung aller Risiken, sondern in der Steuerung der Gesamtheit der Risiken. Für die Erwirtschaftung eines Gewinns müssen zwangsläufig Risiken eingegangen werden. Folglich bedeutet Risikomanagement „Risiken unter Einsatz geeigneter risikopolitischer Instrumente dort zu reduzieren, wo das Verhältnis aus erwartetem Gewinn und Risiko zu gering ist, und dort zu erhöhen, wo das Verhältnis aus Gewinn zu Risiko zu hoch ist“ (Schmitz 2007, S. 11). Das Risikomanagement ist somit ein wesentlicher Erfolgsfaktor im unternehmerischen Handeln (Pfenning 2000).

Im Sinne eines integrierten Managements erstreckt sich das Risikomanagement auf drei hierarchische Ebenen (Schwaninger 1994) (Bleicher 2004) (Pischon und Liesegang 1999). Übergeordnet werden auf normativer Ebene mit der Risikopolitik die langfristigen Ziele definiert. Anschließend werden die mittelfristigen Ziele auf der strategischen Ebene aus diesen abgeleitet. Auf operativer Ebene wird das Risikomanagement mithilfe des Risikomanagementprozesses realisiert (Romeike 2003b) (Voigt 2010).

Trotz der heterogenen Darstellungen (Maier 2007) (Romeike 2005) (Lutz und Klaproth 2004) (Schröder 2005) bzgl. der Phasen des Risikomanagementprozesses stellt dieser i.d.R. einen kontinuierlichen Regelprozess in Form eines Zyklus dar (Beinert 2003). Weiterhin stimmen die Tätigkeiten der Autoren, welche sie innerhalb eines Zyklus anordnen, häufig überein. Eine Differenzierung bestehender Risikomanagementprozesse findet

sich beispielsweise in (Schmitz 2007). Abbildung 21 visualisiert exemplarisch die Prozessphasen im Risikomanagementprozess.

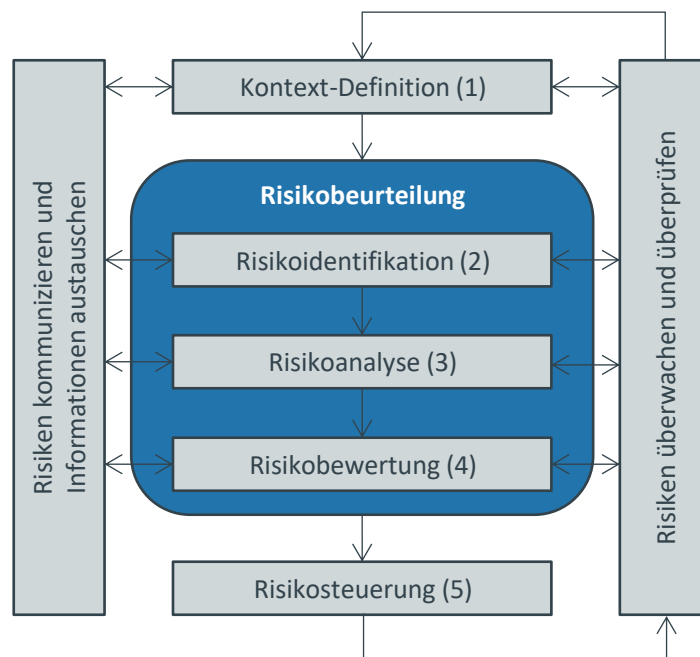


Abbildung 21: Risikomanagementprozess Risikomanagementprozess (DIN ISO 31000, S. 22)

Der Prozessablauf, welcher i.d.R. fünf Hauptphasen umfasst, ist auf die betrachteten individuellen Geschäftsprozesse anzupassen. Eingangs erfolgt eine Kontext-Definition zur Bestimmung aller externen und internen Einflussfaktoren auf die spätere Handhabung der Projektrisiken. Sie bilden die Grundlage zur Ableitung der Risikokriterien für die anschließende Risikobeurteilung. In diesem Zusammenhang wird ein Bewertungsmaßstab zur Differenzierung der Risikoarten und -level definiert. Intention ist es, die Risikobereitschaft sowie -toleranz der Stakeholder, welche in Einklang mit der Risikopolitik sowie –managementstrategie stehen sollten, festzulegen (DIN ISO 31000) (Project Management Institute 2013). Anschließend gilt es möglichst vollständig Risiken für das Unternehmen zu identifizieren sowie zu analysieren, um die wesentlichen Risiken zu bewerten. Dies ist Voraussetzung zur anschließenden Steuerung der Risiken durch die Initiierung geeigneter Maßnahmen. Die Risiken und Maßnahmen sind zu dokumentieren, zu überwachen sowie zu überprüfen. Anschließend erfolgt ggf. eine Rückkopplung bzgl. der Zweckmäßigkeit der im Rahmen der Risikostrategie definierten Prämissen.

Für die erfolgreiche Realisierung eines Risikomanagements bedarf es darüber hinaus der Einbeziehung sowohl interner als auch externer Stakeholder. Die bereichs- sowie prozessübergreifende Kommunikation wird als unterstützender Prozess über den gesamten Risikomanagementprozess angesehen.

Während die stetige Evolution der Risikomanagementstrategien, basierend aus der Rückkopplung des Risikomanagementprozesses zur Anpassung an die modifizierten Rahmenbedingungen, ein begleitender Prozess des Risikomanagementprozesses ist, bilden die Prozessschritte zwei bis fünf den Prozess des Risikomanagements im engeren Sinn (Lutz und Klaproth 2004) ab. Mit der Überarbeitung der Norm (DIN ISO 31000) wird das Aufzeichnen sowie das Berichten der Risiken als expliziter Teilprozess gegenüber den verbleibenden Teilprozessen betrachtet. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf der Risikobeurteilung, sodass dass der Teilprozess nicht isoliert betrachtet wird. Die Phasen des Kreislaufprozesses des Risikomanagements im engeren Sinn werden im Folgenden analysiert.

4.2 Risikoidentifikation

Erster und wichtigster Schritt bei der Risikobeurteilung ist die Risikoidentifikation, bei der möglichst vollständig und kontinuierlich alle Risiken, Risikoursachen und -folgen für ein Unternehmen sowie deren Geschäftsprozesse aufgenommen werden (DIN ISO 31000) (Voigt 2010). Im Sinne dieser Arbeit sind dies nur Risiken im engeren Sinne (vgl. Kap. 3). Die Dynamik der Risiken erfordert eine fortlaufende Erfassung. Für die weitere Handhabung der Risiken bildet die Risikoidentifikation die Basis. Nicht identifizierte Risiken werden nicht weiter betrachtet (Romeike 2005) (Maier 2007) (DIN ISO 31000). Generell werden nur Risiken erfasst, die als wesentlich angesehen werden (Voigt 2010). Bedingt durch sowohl situative als auch individuelle Komponenten bei der Risikoidentifikation ist der Prozess subjektiv und schwierig zu objektivieren (Maier 2007). Eine eindeutige Risikodefinition sowie -klassifikation (vgl. Kap. 3.1. und Kap. 3.2) ist somit Voraussetzung für die Risikoidentifikation (Voigt 2010).

Zur Risikoidentifizierung können die Mitarbeiter verschiedene Methoden verwenden. Vor der Methodenauswahl muss die Vorgehensweise für den Suchprozess definiert werden. Diese kann sowohl als Top-Down, Bottom-Up oder auch als Kombinatorik der beiden Vorgehensweisen vorgenommen werden. Während der Top-Down-Ansatz vom Groben, der Unternehmensebene, immer detaillierter bis zur operativen Ebene vorgeht, beginnt der Bottom-Up-Ansatz detailliert auf operativer Ebene und wird zunehmend rudimentärer. Mit Einsatz des Top-Down-Ansatzes werden i.d.R. schneller Ergebnisse erzielt als mit dem Bottom-Up-Ansatz, jedoch können Risiken übersehen werden und es wird kein Risikobewusstsein auf den unteren Unternehmensebenen geschaffen (Brühwiler 2001). Die Methoden der Risikoidentifizierung dienen der Datenerhebung und nutzen folglich als

Basismethoden Primär- und Sekundärerhebungsmethoden. Diese sollten stets im Kontext des Untersuchungsgegenstandes ausgewählt werden (Hoffmann und Neumann 2011). Im Fokus stehen i.d.R. Methoden der Primärdatenerhebung, die selbstständig erhoben werden, aber auch Methoden der Sekundärdatenerhebung können verwendet werden. Bezogen auf den Anwendungsfall der Wiederverwendung von Entwurfselementen kann beispielsweise auf Sekundärdaten im Rahmen einer Dokumentenanalyse zurückgegriffen werden. Die Methoden der Primärerhebung untergliedern sich wiederum in Befragungen und Beobachtungen (vgl. Abbildung 22).

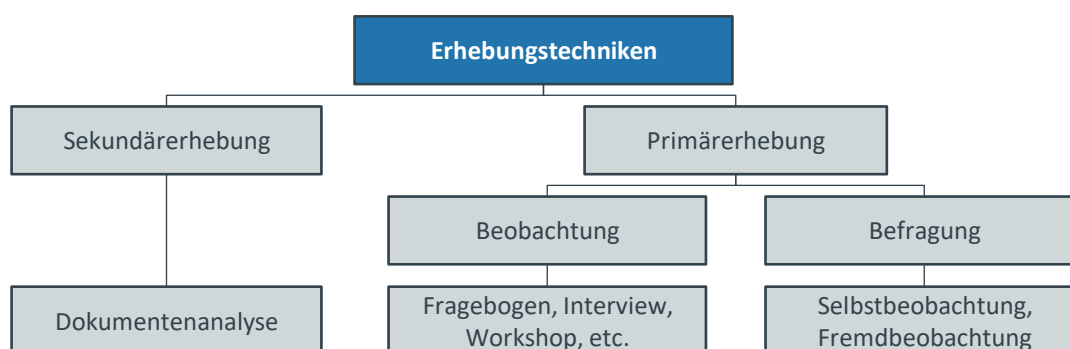


Abbildung 22: Klassifizierung der Datenerhebungstechniken (Jodin und Mayer 2004, S. 4)

Weiterhin werden die Methoden der Risikoidentifizierung in systematische (analytisch strukturiert) sowie unsystematische (kreativ-intuitive) Methoden differenziert (Ziegenbein 2007) (Voigt 2010). Während unsystematische Methoden sich auf die Subjektivität der Mitarbeiter stützen und gleichzeitig deren Kreativität fördern, geben systematische Methoden einen vordefinierten Lösungsweg vor. Für eine möglichst ganzheitliche Risikofassung sollte sowohl bei der Verwendung unsystematischer als auch systematischer Methoden ein interdisziplinäres sowie bereichsübergreifendes Team in diesen Teilprozess involviert sein (Wolke 2008) (Werdich 2012).

Aufbauend auf den erfassten Daten können mithilfe von Prognosemethoden auch zukünftige Risiken ermittelt werden. I.d.R. wird zwischen intuitiven bzw. qualitativen und analytischen bzw. quantitativen Methoden differenziert (Wöhe und Döring 2002). Während quantitative Methoden für die Bestimmung zukünftiger Informationen die Variablen des betrachteten Prognosemodells mittels mathematischer Operatoren verknüpfen, greifen die qualitativen Verfahren auf verbalargumentative Verknüpfungen zurück (Horváth 2011).

Tabelle 3 gibt eine Übersicht gebräuchlicher Methoden zur Risikoidentifizierung. Eine eindeutige Zuordnung der Methoden ist dabei nicht immer gegeben. Beispielsweise

werden bei der Anwendung des morphologischen Kastens, der Synektik oder auch des Mind-Mappings den Ablauf vorgegeben, jedoch die kreative Lösungsfindung gefördert. Darüber hinaus ist für eine umfassende Darstellung der Risiken häufig die Verwendung mehrerer Methoden erforderlich.

Tabelle 3: Methodencluster zur Risikoidentifizierung (Voigt 2010) (VDA 4-2) (Romeike 2003c) (Alfen et al. 2010) (Huth und Romeike 2016) (Königs 2013) (Romeike 2018)

Basismethoden	Unsystematische Risikoerfassung	Systematische Risikoerfassung
<ul style="list-style-type: none"> • Befragung von fachkundigen Mitarbeitern/Experten • Besichtigungsanalyse • Dokumentationsanalyse 	<ul style="list-style-type: none"> • Brainstorming • Brainwriting • Delphi-Methode, • Interviews • Mind-Mapping • Morphologischer Kasten • Pondering • SWAT-Analyse • Synektik • Bedienungsfehleranalyse • KJ-Methode • System Dynamics • Business Wargaming 	<ul style="list-style-type: none"> • Checklisten/Fragebögen • Ereignisbaum • Fehlerbaumanalyse • FMEA • Frühwarnsystem • Netzplantechnik • Organisationsanalyse (Aufbau- und Ablauforganisation): Prozess bzw. Input-/ Outputanalyse, Flowchart • Simulationen • Szenario-Technik • Ursache-Wirkungs-Diagramm (Ishikawa) • Workshops („Risk Assessment“)

Ergebnis der Risikoidentifikation bildet ein Risikoinventar, welches alle identifizierten Risiken subsumiert und ggf. zusammenfasst. Sowohl Detaillierung als auch Umfang des Risikoinventars sind unternehmens- sowie geschäftsbereichsindividuell (Voigt 2010). Eine Kategorisierung der mit den im Anwendungsfall verbundenen Risiken im Anlagenengineering findet sich in Kapitel 3.2.

4.3 Risikoanalyse

Ziel der anschließenden Risikoanalyse ist es, die für die nachfolgende Risikobewertung erforderlichen Eingangsgrößen bereitzustellen. Folglich bildet sie aufbauend auf der Risikoidentifizierung die Basis für die Risikobewertung. In Abhängigkeit der gewählten Risikobewertungsmethode (vgl. Kap. 4.4) erfolgt eine qualitative bzw. quantitative Analyse, die auf die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Ursachen der zuvor identifizierten Risiken sowie das Ausmaß der Zielabweichung in einem definierten Zeitraum (vgl. Kap. 3.1) fokussiert. Bei der Risikoanalyse müssen die Interdependenzen zwischen den Einzelrisiken sowie bereits realisierte Risikominimierungsmaßnahmen berücksichtigt werden (vgl. Kap. 3.1) (DIN ISO 31000). Für die Erfassung der Abhängigkeiten können detaillierte

Prozessanalysen (Input-Output) mithilfe von IT-Werkzeugen, wie beispielsweise die „Architektur integrierter Informationssysteme“ (ARIS) genutzt werden (König 2008). Darüber hinaus muss die Unsicherheit der Eingangsdaten beispielsweise bzgl. des Stichprobenumfangs, der Datenaktualität, der Meinungsdivergenzen sowie methodischer Restriktionen für die anschließende Erstellung des Risikomodells bei der Analyse betrachtet werden (DIN ISO 31000). Die Risikoanalyse dient weiterhin der späteren Entwicklung von Risikosteuerungsmaßnahmen, denn bei der Betrachtung der Ursachen ergeben sich bereits der Entstehungsort, die Ausprägungsarten sowie die Beeinflussbarkeit durch das Unternehmen (Lück 2000).

4.4 Risikobewertung

Mit der Risikobewertung ist die Risikobeurteilung, welche die Entscheidungsgrundlage für die Einleitung der Maßnahmen hinsichtlich Art und Intensität zur Beherrschung der Risiken bildet, abgeschlossen (Hoffmann und Neumann 2011). In diesem Zusammenhang definiert die Risikobewertung das Ausmaß der Gefährdung der zuvor definierten Unternehmensziele durch die Risiken (Voigt 2010). Intention ist hierbei sowohl die Priorisierung der Einzelrisiken für die spätere Risikosteuerung als auch die Risikoaggregation. Für die Risikosteuerung wird das Risiko eingangs brutto, d.h. ohne Maßnahmen, und anschließend netto, unter Berücksichtigung der Maßnahmen, bewertet (Denk und Exner-Merkelt 2005).

Sowohl bzgl. der Bezeichnung als auch der Strukturierung der Risikobewertungsmethoden herrscht kein Konsens in der Literatur (Alfen et al. 2010). Im Folgenden wird nicht zwischen den Methoden der Risikoanalyse sowie Bewertung differenziert, da diese sich gegenseitig bedingen. Die Methoden der Risikoidentifizierung geben den Ablauf der Risikobewertung vor. Bei der Anwendung von Bottom-Up-Methoden, auch als induktive Methoden bezeichnet, werden die Einzelrisiken auf unteren Hierarchieebenen bewertet und anschließend die Folgen für höhere Hierarchieebenen hergeleitet. Abschließend werden die Risiken aggregiert. Hingegen fokussieren Top-Down-Methoden, auch als deduktive Methoden bezeichnet, auf bekannte Ereignisse, wie beispielsweise Kennzahlen und Schadensstatistiken (Romeike 2005).

Die im vorherigen Kapitel vorgestellten Charakteristika des Risikos zielen auf die Klassifizierung des Risikobegriffs ab (vgl. Kap. 3). Sie beschreiben jedoch nicht die Messung des Risikos. Diese soll im Folgenden kurz vorgestellt werden. Für die Bewertung des Risikos muss berücksichtigt werden, dass „die Furcht vor Schaden nicht nur der Schwere des Schadens, sondern auch der Wahrscheinlichkeit des Ereignisses proportional sein“

(Bernstein 2017, S. 94) sollte. Der mathematische Ansatz definiert das Risiko nach der Risikothorie von Laplace als Produkt von Schadensausmaß (Quantität) und Eintrittswahrscheinlichkeit (Intensität) (Rommelfanger 2008). Im technischen Kontext wurde die Auffassung, dass das Risiko den statistischen Erwartungswert eines unerwünschten Ereignisses abbildet, erstmals von (Ramussen 1975) beschrieben und gilt seitdem als Standard (VDI/VDE 3542-1) (EN ISO 12100) (Wördenweber und Wickord 2001) für die technische Risikobeurteilung (vgl. Formel 1).

$$\text{Risikohöhe: } F * G = \left(\frac{N * T}{PRE} \right) * \left(\frac{D}{PRO} \right)$$

Formel 1: Risikoausprägung (Meyer und Reniers 2013)

F: Intensität (Aufretenswahrscheinlichkeit bzw. Frequenzen, der das zu beurteilende Objekt einer risikoinduzierten Gefahr ausgesetzt ist)

N: Anzahl risikobehafteter Teilobjekte

T: Arithmetisches Mittel der Expositionszeit bzw. Dauer, der ein Objekt einer risikoinduzierten Gefahr ausgesetzt ist

PRE: Implementierte Maßnahmen zur Reduktion von N und/oder T

G: Quantität (Tragweite der Risikofolgen)

D: Grad der risikoinduzierten Gefahr

PRO: Grad der installierten Sicherungsmaßnahmen zur Reduzierung der Quantität

Dieser Ansatz ermöglicht eine qualitative bzw. quantitative Aussage bzgl. der Ausprägungen des Risikos für die spätere Risikosteuerung (Kupsch 1973). Die Komplexität dieses Risikomodells steigt mit den Anforderungen des Systems, welches abgebildet wird. Beispielsweise bedarf es zusätzlich der Darstellung der Abhängigkeiten der Systemelemente (Rommelfanger 2008). Generell ist zu beachten, dass das Risiko ein statistischer Wert ist, der keine verbindliche Aussage (vgl. Kap. 3.1) bzgl. eines Ereignisses erlaubt (Hofmann 2000).

Zusammenfassend ergibt sich die Bewertung der Einzelrisiken aus der Kombinatorik der Eintrittswahrscheinlichkeit der Ursachen sowie der potentiellen Schadenshöhe (Pfenning 2000). Für die Risikobewertung werden die Risiken mit den eingangs definierten Risikokriterien gegenübergestellt. Neben diesen Eingangsgrößen müssen auch die Ergebnisse

der vorherigen Analyse, wie z.B. die Wechselwirkungen zwischen den Einzelrisiken, berücksichtigt werden. Im Sinne eines effizienten Risikomanagements sollte die Risikobewertung folgenden Anforderungen gerecht werden (Buchhart und Burger 2001):

- Objektivität der Einschätzung,
- Vergleichbarkeit der Risiken,
- Quantifizierung für Aggregation und
- Berücksichtigung von Interdependenzen der Einzelrisiken.

Eine quantitative Bewertung der Risiken ist nicht immer gegeben. So können beispielsweise nicht alle Risiken monetär gemessen werden. Um auch diese Risiken zu bewerten, bieten sich qualitative Verfahren mit Zuordnungen in Risikoklassen an (Hoffmann und Neumann 2011). Für die Risikobewertung bedarf es folglich sowohl quantitativer als auch qualitativer Methoden (Keitsch 2004) (Romeike 2005). Die Auswahl der Bewertungsmethode ist von der Genauigkeit der Bestimmung der Wahrscheinlichkeiten sowie dem Abbildungsvermögen der Risiken als monetäre Größen abhängig (Voigt 2010). Hierbei gilt es zu beachten, dass quantitative Methoden i.d.R. eine höhere Aussagekraft für das Risikomanagement haben. Weitere Kriterien für die Methodenauswahl sind die Ziele des Methodeneinsatzes sowie die bereitgestellten Ressourcen (AS/NZS 4360).

Eine quantitative Risikobewertung erfolgt auf Basis mathematisch statistischer Methoden, welche für aussagekräftige Ergebnisse i.d.R. eine hinreichend große Datenmenge auf objektiver Basis benötigen (Romeike 2005) (Voigt 2010). Umfangreiche Statistiken liegen in der Praxis nur für eine begrenzte Anzahl von Risiken vor, wie beispielsweise für PKW-Unfälle (Rommelfanger 2008) (Romeike 2005). Die Datenverfügbarkeit zur systematischen und durchgängigen Risikosteuerung über den gesamten Produktionslebenszyklus ist häufig unzureichend, da die erforderliche Qualitätskultur nicht in allen Hierarchieebenen verankert ist (Wißler 2006). Für jede Input-Größe des Risikomodells ist zu bestimmen, ob diese eine stochastische oder deterministische Ausprägung aufweist. Weiterhin ist es erforderlich, dass eine objektive bzw. subjektive Wahrscheinlichkeitsverteilung der Variablen vorliegt (vgl. Kap. 4.2). Diese können beispielsweise auf Basis von Erfahrungswerten, Statistiken, Zeitreihenanalyse-Studien, Modellen oder, wenn nicht vorhanden, durch Expertenschätzungen definiert werden (Voigt 2010). Für die Bewertung können verschiedenste Methoden verwendet werden (vgl. Tabelle 4). Hinausgehend über eine Bewertung der vorliegenden Daten bieten sich Szenarioanalysen an, um auf zukünftige Ereignisse zu schließen (vgl. Kap. 4.2). In diesem Zusammenhang können Best- sowie Worst-Case-Szenarien bewertet werden.

Bedingt durch die unzureichende Datenbasis bzw. den zu bewertenden Anwendungsfall, bspw. wenn lediglich eine schnelle erste Abschätzung des Risikos vorgenommen wird, werden quantitative Methoden teilweise auch qualitativen Methoden vorgezogen (Biegert 2000). Eine qualitative Bewertung stützt sich primär auf subjektive sowie intuitive Informationen (Romeike 2005) (Voigt 2010) und unterliegt folglich den Präferenzen des Entscheiders (Maier 2007). In diesem Zusammenhang werden die Risiken bzw. die Auftretenswahrscheinlichkeiten und die Schadensfolgen auf Nominal- oder auch Ordinalskalen abgebildet (Hoffmann und Neumann 2011). Häufig werden die Risiken anschließend in einer Matrix, der Risk-Map, mit den Achsen Eintrittswahrscheinlichkeit sowie Schadensausmaß visualisiert, um eine Priorisierung für die Risikosteuerung zu ermöglichen (vgl. Abbildung 23). Risiken mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit und großen negativen Auswirkungen werden hierbei Risiken mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit und geringer Auswirkung vorzugsweise bearbeitet. Identische Risikowerte verschiedener Risiken sind jedoch ggf. nicht miteinander vergleichbar (Kupsch 1973).

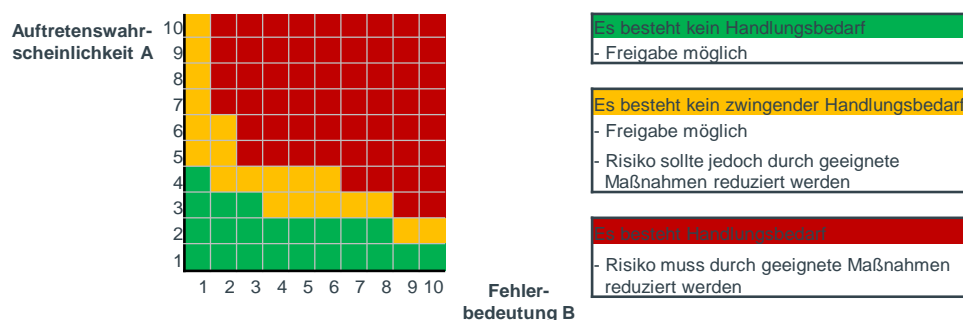


Abbildung 23: Risikomatrix (VDA 4-2, S. 65)

Zur Reduzierung der Subjektivität der Bewertungen und Vermeidung von Scheingenauigkeiten sollte die Differenzierung der Klassen auf Grundlage von vordefinierten sowie eindeutigen Merkmalen durch mehrere Experten erfolgen. Eine zielgerichtete Risikosteuerung ist mithilfe qualitativer Methoden nur bedingt möglich, jedoch geben sie einen ersten Anhaltspunkt zur Abschätzung der Risiken und machen diese untereinander vergleichbar. Auf Basis der qualitativen Methoden wird ersichtlich, welche Risiken beispielsweise quantitativ bzw. detailliert, betrachtet werden sollten (Voigt 2010). (Bepferling 2008) führt zusätzlich semi-quantitative Methoden auf. Hierbei werden den qualitativen Aussagen Zahlenwerte für ein erweitertes Ranking zugeordnet.

Liegt eine quantitative Bewertung der Einzelrisiken vor, können diese zur Gesamtrisikoposition des Unternehmens, dem „Risk Exposure“, aggregiert werden. Bedingt durch die Interdependenzen zwischen den Risiken entspricht dieses i.d.R. nicht der Summe der Einzelrisiken (Romeike 2003a) (Voigt 2010). Hierbei müssen die eingangs analysierten

kompensatorischen und kumulativen Effekte Berücksichtigung finden, um Ausgleichs- bzw. Verstärkungseffekte für die Steuerungsmaßnahmen zu berücksichtigen (Martin und Bär 2002; Voigt 2010) (Voigt 2010). Zur Ermittlung des Einflusses wesentlicher Einzelrisiken auf die Gesamtrisikoposition bieten sich Sensitivitätsanalysen an, bei denen jeweils einzelne Parameter modifiziert werden (Voigt 2010).

Für die Risikoaggregation stehen beispielsweise die analytische Methode für normalverteilte Einzelrisiken, die historische Simulation bei ausreichend großem und aktuellem Datenbestand sowie die Monte-Carlo-Simulation, die sowohl zeit- als auch rechenaufwendig ist, zur Verfügung.

Zusammenfassend lassen sich die Methoden wie folgt klassifizieren:

- Vorgehen: deduktiv/induktiv bzw. Bottom-Up/ Top-Down,
- Ausgangsgrößen: quantitativ/ qualitativ/ semiquantitativ/ Aggregation,
- Ggf. mathematisches Modell: probabilistisch /stochastisch und
- Zeitvarianz: statisch/ dynamisch

Tabelle 4 gibt eine entsprechend klassifizierte Übersicht der gebräuchlichen Methoden zur Risikobeurteilung.

Für die Vergleichbarkeit der Risiken gilt es im letzten Schritt der Risikoquantifizierung Risikomaße aus der Verteilungsfunktion abzuleiten. Diese charakterisiert die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Risikokennzahl (Alfen et al. 2010). In der Betriebswirtschaft finden eine Vielzahl von Risikomaßen Anwendung (Gleißner 2006b) (Gleißner 2006a) (Gleißner und Wolfrum 2009) (Schierenbeck 2006).

Im Allgemeinen ist zwischen lageunabhängigen Risikomaßen, die das Ausmaß der Abweichung von einer Zielgröße quantifizieren, und lageabhängigen Risikomaßen, welche von der Höhe des Erwartungswertes abhängig sind, zu differenzieren. Ein lageunabhängiges Risikomaß ist beispielsweise die Standardabweichung, die die positive und negative Zielabweichung vom Erwartungswert ausdrückt.

Hingegen charakterisiert das lageabhängige Risikomaß „Value-at-Risk“ die Schadenshöhe, die bei einer festgelegten Wahrscheinlichkeit p („Konfidenzniveau“ $L = 1 - p$) in einem definierten Zeitraum nicht überschritten wird. Weitere Risikomaße wie z.B. der Eigenkapitalbedarf, die Shortfall-Risikomaße und die daraus abgeleiteten Performancemaße finden sich beispielsweise in (Alfen et al. 2010) (Gleißner und Wolfrum 2009) (Gleißner 2006a) und werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet.

Tabelle 4: Methodenübersicht Risikobeurteilung (DIN EN 31010, S. 22) (Voigt 2010) (Piaz 2002) (Neudörfer 2013; Königs 2013) (Alfen et al. 2010) (Denk und Exner-Merkelt 2005) (Königs 2013) (Arbatschat 2016) (Voigt 2010) (VDA 14)

Methoden	Vorgehen		Ausgangsgrößen				math. Modell		Zeitvarianz	
	induktiv	deduktiv	quantitativ	qualitativ	semi-quantitativ	aggregiert	probabilistisch	stochastisch	statisch	dynamisch
Baye'sche Netze	X	X	X				X		X	X
Bow Tie Analysis		X	X				X		X	
Deterministische Szenarioanalyse/ -technik	X		X	X		X	X		X	
Entscheidungsbaumanalyse	X		X				X		X	
Equi-Risk-Contour	X		X				X			
Ereignisbaumanalyse (ETA)	X		X				X		X	
Extremwert-Theorie		X	X							X
Fehlerbaumanalyse (FTA)		X	X				X		X	
Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA)	X			X	X		X		X	
Fehler-Ursachen-Analyse (u.a. ABC-Analyse)		X	X	X					X	
F-N-Diagramm	X		X				X		X	
Historische Simulation	X	X	X				X	X	X	X
Human Reliability Analysis (HRA)	X		X				X		X	
Kosten-Nutzen-Analyse	X		X				X		X	
Layer-of-Protection-Analyse (LOPA)	X		X				X		X	
Markow-Analyse	X		X				X		X	X
Multikriterielle Entscheidungsanalysen (MCDA)/ Scoring Modelle u.a. Analytischer Hierarchie Prozess, Nutzwertanalyse, Promethee,		X			X	X	X		X	
Multivariate Monte-Carlo-Simulation	X	X	X					X	X	X

Methoden	Vorgehen		Ausgangsgrößen				math. Modell		Zeitvarianz	
	induktiv	deduktiv	quantitativ	qualitativ	semi-quantitativ	aggregiert	probabilistisch	stochastisch	statisch	dynamisch
PAAG-Verfahren bzw. Operabilitätsanalyse (HAZOP)	X			X			X		X	
Regressions- und Korrelationsanalyse	X		X			X	X		X	
Relativ Risk Weighting-Verfahren		X	X					X	X	X
Risikoindizes u.a. Key Performance Indicator (KPI) Key Risk Indicator (KRI) und Key Control Indicator (KCI)	X		X			X	X		X	
Risikomatrize bzw. Risk-Map	X			X	X		X		X	
Sensitivitätsanalyse	X		X			X	X		X	
Stochastische-Petri-Netz-Analyse	X	X	X					X		X
Structured What If Technique (SWIFT)	X			X			X		X	
Strukturierte und semi-strukturierte Expertenbefragung/-schätzung (Qualitative Bewertung mit u.a. Risikoliste, Bewertungskatalog, Relevanzabschätzung)	X			X			X		X	
Strukturierte und semi-strukturierte Expertenbefragung/-schätzung (Quantitative Bewertung u.a. für binomialverteilte Risiken, Korrekturverfahren mittels Risikozuschlägen)	X		X				X		X	
Quantitative Bewertung u.a. durch Experten für binomialverteilte Risiken, Korrekturverfahren mittels Risikozuschlägen	X		X				X		X	
Ursache-Folgen-Analyse (Kombination von FTA und ETA)	X	X	X			X	X		X	
Varianz-Kovarianz-Modell (Value at Risk)		X	X			X		X		

4.5 Risikosteuerung

Im Anschluss an die Risikobeurteilung schließt sich die Risikosteuerung, die den Umgang mit den Risiken definiert, an. Intention der Risikosteuerung ist es, die Risikoposition des Unternehmens auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. Für die Risikosteuerung stehen mit der Risikovermeidung und -minimierung aktive sowie mit der Risikoübertragung und -akzeptanz passive Steuerungsmaßnahmen zur Verfügung (Romeike 2005) (Brühwiler 2007). Während die aktiven Steuerungsmaßnahmen, die Risiken direkt mit ursachenbezogenen Maßnahmen, mit Einfluss auf die Eintrittswahrscheinlichkeit oder das Schadenspotential, reduzieren, wird bei passiven Maßnahmen nicht die Risikostruktur beeinflusst (Sauerwein und Thurner 1998). Die Auswahl von Steuerungsmaßnahmen erfolgt i.d.R. unter Betrachtung des Kosten-Nutzenverhältnisses bei Berücksichtigung von gesetzlichen, sozialen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für das Unternehmen (DIN ISO 31000). Die (DIN ISO 31000, S. 28) charakterisiert folgende Maßnahmenklassen:

- Im Rahmen der **Vermeidung** werden die Risiken vollständig eliminiert. Resultierend werden risikobehaftete Aktivitäten nicht gestartet und laufende Aktivitäten beendet. Darüber hinaus können auch Maßnahmen zur Beseitigung der Risikour-sachen getroffen werden.
- Bei der **Minimierung** werden durch Maßnahmen die Qualität und/oder die Intensität des Risikos auf ein akzeptables Niveau reduziert. Ein Restrisiko bleibt bestehen.
- Die **Übertragung** der Risiken zielt auf die Auslagerung bzw. Versicherung, Diversifizierung bzw. das Streuen der Risiken auf mehrere Parteien ab.
- Überwiegt die Chance einer Aktivität die Risiken bzw. sind die Risiken hinreichend gering, können Risiken auch **akzeptiert** werden.

In der Praxis stehen nicht immer alle Maßnahmen zur Verfügung. Beispielsweise sind Sicherheitsrisiken für produzierende Unternehmen zu vermeiden, da der Schutz von Mitarbeitern und Kunden Priorität hat (DIN ISO 31000).

4.6 Risikomanagementdokumentation und Risikoreporting

Im Anschluss an die Risikosteuerung wird ein Implementierungsplan, der die Umsetzung und den Nutzen der Maßnahmen beschreibt, erarbeitet. Eine frühzeitige Einbeziehung der Stakeholder in die wesentlichen Entscheidungsprozesse erleichtert die Realisierung der Maßnahmen. Im Rahmen des gesamten Risikomanagementprozesses unterstützen eine durchgängige Kommunikation und aktive Mitarbeit, dass (DIN ISO 31000, S. 19) :

- die **Interessen** aller Risikoverantwortlichen **Berücksichtigung** finden,
- die **Expertise** verschiedenster Fachbereiche **zusammengetragen** wird und Synergien entstehen,
- verschiedene **subjektive Sichtweisen** in die Risikobewertung **einfließen** und
- die **Risikosteuerungsmaßnahmen** frühzeitig **unterstützt** werden.

Voraussetzung hierfür ist eine Risikomanagementkommunikation (Denk und Exner-Merkelt 2005). Es muss ein systematischer Informationsfluss, bezüglich der Ergebnisse aus der Risikobeurteilung, -steuerung und der Planung bzw. Umsetzung der Maßnahmen zur Risikoreduzierung, an alle wesentlichen Stakeholder garantiert sein, damit diese auf Risiken frühzeitig reagieren können (Voigt 2010). Während unternehmensintern die Risikoberichterstattung z.B. für Führungskräfte und den Aufsichtsrat i.d.R. frei gestaltbar ist, unterliegt diese unternehmensextern, z.B. für externe Wirtschaftsprüfer und Shareholder, häufig gesetzlichen Vorgaben. Das Berichtswesen ist dabei mit dem Berichtssystem abzustimmen (Voigt 2010). Unternehmensintern sollten Berichte neben der Beschreibung des Risikos und der Maßnahmen auch die Kontrollen, Indikatoren sowie eine Einschätzung des verbleibenden Restrisikos durch eine Ampelfunktion beinhalten. Häufig erfolgt die Dokumentation mittels Risikomanagementhandbuch. Dieses verfolgt mit der Dokumentation der risikoorientierten Unternehmensrichtlinien und -standards sowie den getroffenen Maßnahmen folgende Ziele (Buchhart und Burger 2001):

- **Sicherungsfunktion:** Einhaltung der Risikosteuerungsmaßnahmen,
- **Rechenschaftsfunktion:** Nachvollziehbarkeit der Ordnungsmäßigkeit von Entscheidungen gegenüber Unternehmensführung und
- **Prüfbarkeitsfunktion:** Prüfbarkeit des Risikomanagementsystems durch interne Revision bzw. Abschlussprüfer.

4.7 Risikoüberwachung

Ausgehend von der Risikoüberwachung, die sich über den gesamten Risikomanagementprozess erstreckt, wird der Risikomanagementprozess erneut initiiert. Die Risikoüberwachung ist eine kontinuierliche Überprüfung der Effizienz und Wirksamkeit der Maßnahmen sowie Prozesse des Risikomanagements. In diesem Zusammenhang erfolgt ein Soll-Ist-Abgleich der Risiken, um sicherzustellen, dass mit den definierten Maßnahmen die geforderte Risikoposition des Unternehmens erreicht wird und ggf. zusätzliche, durch die Maßnahmen induzierte Risiken erkannt werden.

Die ständige Überprüfung der Risiken dient u.a. der möglichst vollständigen Erfassung aller Risiken (König 2008). Bedingt durch die volatilen Umweltbedingungen dient die kontinuierliche Risikoüberwachung auch der Überprüfung der getroffenen Entscheidungen in Bezug auf die risikospezifischen Veränderungen (Voigt 2010). Diese können auch Änderungen in der Risikopolitik, beispielsweise der Risikogrenzwerte, was eine neue Bewertung der Risiken zu Folge hätte, umfassen (König 2008).

In diesem Zusammenhang dient die kontinuierliche Risikoüberwachung auch der Kontrolle des Risikomanagements, ggf. erfolgt eine Rückkopplung der Ergebnisse bzgl. Schwachstellen und Defiziten des Risikomanagementsystems auf die normative sowie strategische Unternehmensebene (Voigt 2010) (DIN ISO 31000).

4.8 Wiederverwendung von Risikobeurteilungen

Die häufige Modifikation der systeminternen Anlagenkonfiguration sowie der systemexternen Umwelteinflüsse auf die Anlage bedingt eine Vielzahl von Risikobeurteilungen (DIN EN ISO 12100). Die Risikobeurteilung darf während der Entwicklung keinen Engpass darstellen (Liggesmeyer und Trapp 2017). Im Allgemeinen decken sich die zur Anwendung kommenden Wiederverwendungsmechanismen mit denen des Engineerings (vgl. Kap. 2.4).

Von der Ablaufstruktur des Risikomanagementprozesses geht eine Wiederverwendung der Risikobeurteilung innerhalb eines Projektes aus. Der Prozess wird kontinuierlich durchlaufen und Änderungen der Systembedingungen, wie z.B. der Umsetzung von Maßnahmen zur Risikoreduzierung, führen zu einer erneuten Bewertung. In diesem Zusammenhang unterstützt der Prozess bereits die Methodik des „Copy, Paste and Modify“ sowie das „Typ-Instanz-Konzept“.

Die Übertragung der Risikobeurteilungen auf andere Projekte (vgl. Tabelle 1, Zielzustand C-E) erfordert eine zentrale sowie systematische Risikobeurteilung (vgl. Kap. 4.2) mit definierten Schnittstellen hinsichtlich Risikoidentifikation, -analyse und -bewertung für die betrachteten Elemente. Risikobeurteilungen können in anderen Projekten häufig nicht übernommen werden, da sich die Struktur der klassischen Methoden zur Risikobeurteilung häufig nicht mit der Systemstruktur deckt (Liggesmeyer und Trapp 2017). Zur Lösung des Problems im Bereich der Sicherheitstechnik beschreiben (Kaiser et al. 2004) eine modulare Fehlerbaumanalyse und (Liggesmeyer und Trapp 2017) eine modulare FMEA. (Kutzbora 2015) nutzt die modulare FMEA zur Ableitung für die Risikobeurteilung von Montageprozessen.

Die modulare Beschreibung des Fehlverhaltens einzelner Systemkomponenten fußt auf Komponentenfehlerbäumen. Diese subsumieren das Fehlverhalten im Sinne der Systemtheorie von der Komponente auf die Umgebung und von der Umgebung auf die Komponente. Mit der Definition von standardisierten Fehlerschnittstellen (Ein- und Ausgänge), können modulare Komponentenfehlerbäume erzeugt werden, u.a. solche, die hierarchische Strukturen von Anlagen abbilden können (Kaiser et al. 2004).

Das Konzept der modularen FMEA deckt sich mit dem der Fehlerbäume. Die Ursachen der Fehler bilden hierbei die Eingänge der Komponenten und die Ausgänge, die Effekte der Fehler (Kutzbora 2015). Bedingt durch die gleiche Typisierung der Fehlerbilder können beide Verfahren auch miteinander verknüpft werden (Liggesmeyer und Trapp 2017). (Liggesmeyer und Trapp 2017) fordern darüber hinaus eine Formalisierung der FMEA-Semantik und Syntax. Hierbei ist eine Klassifizierung der Maßnahmenwirkung hinsichtlich der Erkennung oder Minimierung der Ursachen unerlässlich.

Aus den Resultaten der Analysen der Teilergebnisse ergibt sich durch die Komposition des Gesamtsystems anschließend eine Risikobeurteilung für das Gesamtsystem. Für die Wiederverwendung im Engineering-Prozess müssen diese Informationen durch einen geeigneten Mechanismus (vgl. Kap. 2.4) wie z.B. Bibliotheken hinterlegt werden.

4.9 Zusammenfassung

Dieses Kapitel bildet den Status quo bzgl. der Methoden zur Risikobeurteilung im Engineering ab. In Kapitel 5 gilt es diese im Kontext der Wiederverwendung zur Beantwortung der Forschungsfragen (vgl. Kap. 4) zu bewerten. Auf operativer Ebene des Anlagenengineerings wird der Umgang mit Risiken durch den Risikomanagementprozess realisiert. Die Risikomanagement-Regelkreise der am Anlagenengineering involvierten Stakeholder sind durch die Wertschöpfung sowohl vertikal als auch horizontal verknüpft. Der Verwendungszweck der Anlage determiniert sowohl die Risiken für den Anlagenhersteller als auch für den Betreiber. Bedingt durch die Kausalität sind die Zulieferer des Anlagenherstellers gleichermaßen involviert. Trotz der unterschiedlichen Rollen innerhalb des Anlagenengineerings ähneln sich die Risikomanagementprozesse (vgl. Abbildung 24).

Eingangs erfolgt eine Kontext-Definition zur Bestimmung aller externen und internen Einflussfaktoren auf die spätere Handhabung der Projektrisiken. Sie bilden die Grundlage zur Ableitung der Risikokriterien für die anschließende Risikobeurteilung. In diesem Zusammenhang wird ein Bewertungsmaßstab zur Differenzierung der Risikoarten und -level definiert. Intention ist es, die Risikobereitschaft sowie -toleranz der

Stakeholder, welche in Einklang mit der Risikopolitik sowie -managementstrategie stehen sollten, festzulegen (DIN ISO 31000) (Project Management Institute 2013). Anschließend gilt es, möglichst vollständig Risiken für das Anlagenengineering zu identifizieren sowie zu analysieren, um die wesentlichen Risiken zu bewerten. Dies ist Voraussetzung zur anschließenden Steuerung der Risiken durch die Initiierung geeigneter Maßnahmen. Die Risiken und Maßnahmen sind zu dokumentieren, zu überwachen sowie zu überprüfen. Abschließend erfolgt ggf. eine Rückkopplung bzgl. der Zweckmäßigkeit der im Rahmen der Risikostrategie definierten Prämissen.

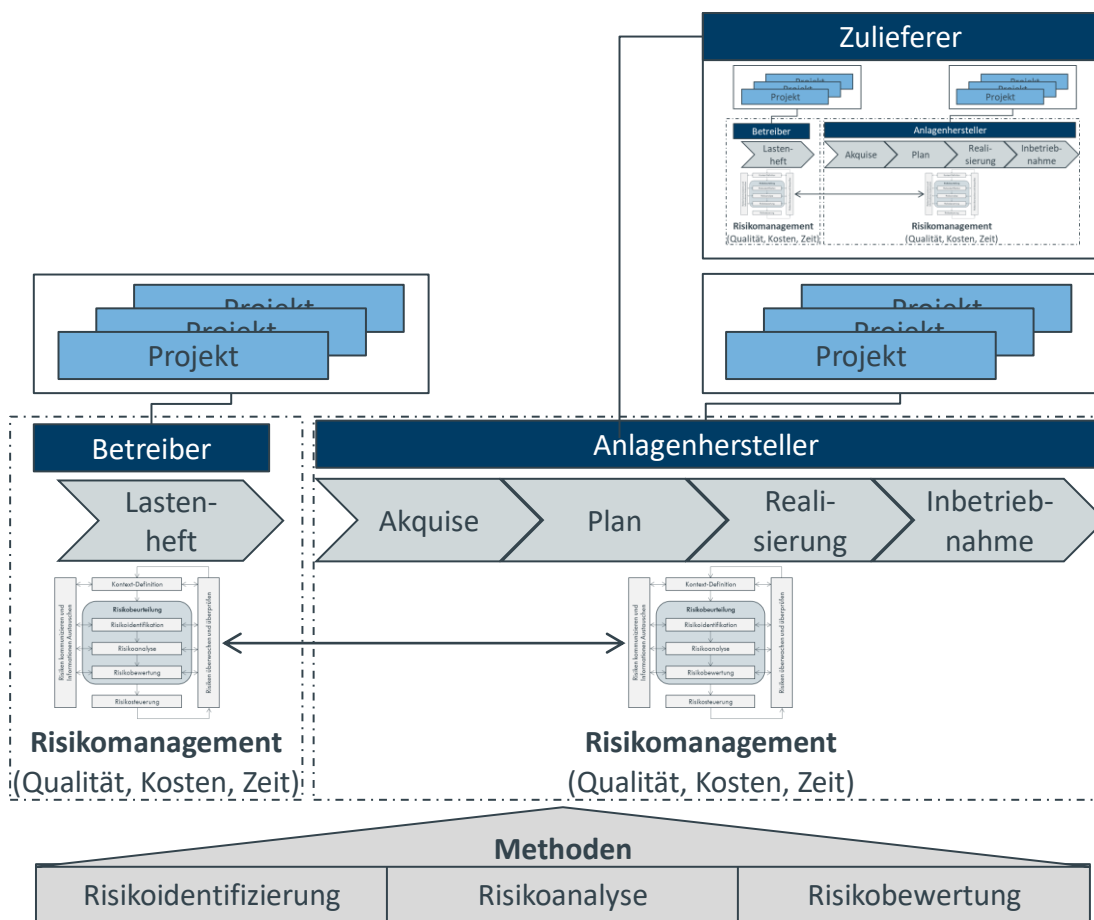


Abbildung 24: Risikomanagement im Anlagenengineering

Für die einzelnen Teilprozesse stehen dem Anwender verschiedene Methoden zur Auswahl (vgl. Kap. 4.2-4.4), die entsprechend dem Anwendungsfall auszuwählen sind. In diesem Zusammenhang sind die Methoden nicht singular zu betrachten. Eine möglichst umfassende Risikoidentifikation sowie anschließende erschöpfende Risikobewertung erfordert i.d.R. eine Kombination verschiedenster Methoden. Die systematische Wiederverwendung von Risikobeurteilungen in verschiedenen Projekten bedingt die Kopplung der Struktur zur Risikobeurteilung mit der Anlagenstruktur sowie eine definierte Semantik und Syntax.

5 Forschungslücken Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung

Dieses Kapitel dient zur Analyse der Grenzen aktueller Methoden im gegebenen Anwendungszusammenhang zur Konkretisierung der Forschungsfragen aus Kapitel 1.2. In diesem Zusammenhang sind die bestehenden Defizite bzgl. der Risikoidentifizierung und der -bewertung zu manifestieren.

Die Herleitung der Forschungsfragen orientiert sich für eine eindeutige Zuordnung an der Vorgehensweise eines Schalenmodells von innen nach außen (vgl. Abbildung 25). Folglich werden im ersten Schritt die für die Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering relevanten Methoden für die Risikobewertung ausgewählt und anschließend bzgl. der Beantwortung der zentralen Forschungsfrage bewertet. Eingangs erfordert dies eine theoriegeleitete Erfassung der Anforderungen an die Methodenauswahl für den in Kapitel 2 und Kapitel 3 vorgestellten Anwendungsfall. Auf Basis der Anforderungen erfolgt die Methodenauswahl (vgl. Kap. 5.1).



Abbildung 25: Ableitung der Forschungsfragen

Die Konkretisierung des Forschungsbedarfs erfolgt auf Basis der abschließenden Bewertung der ausgewählten Methoden in Bezug auf die zentrale Forschungsfrage (vgl. Kap. 5.2):

„Wie können die Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering beurteilt werden, um aufgrund von Prognosen Projektentscheidungen zu treffen?“

Bedingt durch die Kausalität der Teilprozesse des Risikomanagements erfolgt die Herleitung der Forschungsfragen nach dem Pull-Prinzip. Die Risikobewertung als letztes Element der Risikobeurteilung bildet somit den Anfang.

Wie können die Risiken projektbezogen bewertet werden, um Aussagen zur aktuellen Risikoposition sowie der getroffenen Maßnahmen zu treffen?

Anschließend erfolgt die Untersuchung der Risikoanalyse sowie Risikoidentifikation:

„Wie können die potentiellen Risiken bei der Wiederverwendung von Produktionssystemen im Engineering-Prozess frühzeitig erfasst und analysiert werden?“

5.1 Methodenauswahl für die Risikobewertung im Anlagenengineering

Entsprechend des Pull-Prinzips sind im ersten Schritt die Risiken des Anlagenengineerings den Methoden der Risikobeurteilung gegenüberzustellen. Die technischen Risiken im Anlagenengineering untergliedern sich in Prozess-, Produkt- sowie Projektrisiken (vgl. Kap. 3.2). Die Methoden sind entsprechend dem Vorgehen, den Ausgangsgrößen, ggf. des mathematischen Modells sowie der Zeitvarianz zu differenzieren (vgl. Kap. 4.4).

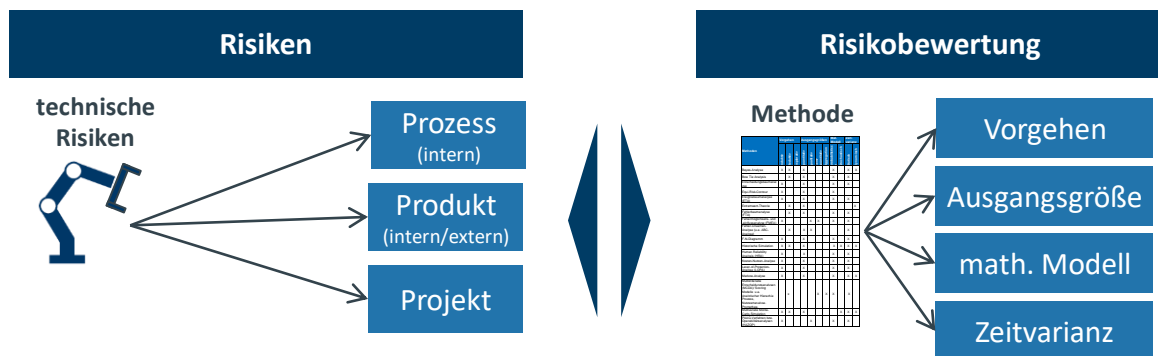


Abbildung 26: Vorgehen Methodenauswahl

5.1.1 Projektrisiken

Intention des Projektmanagements ist es, die zu Projektbeginn definierten Kriterien hinsichtlich Qualität, Zeit und Kosten zu realisieren. I.d.R. werden die Risiken lediglich als Punktschätzung deterministisch ermittelt. Der Grad der Ungewissheit der Schätzung wird hierbei nicht spezifiziert. Eine Vergleichbarkeit der Risiken alternativer Entwurfselemente ist nicht gegeben. Die zu konzipierende Methode soll als Entscheidungsgrundlage für präventive Absicherungsmaßnahmen unter Berücksichtigung der zuvor definierten Projektziele hinsichtlich Kosten und Zeit während des gesamten Produktentstehungsprozesses dienen.

Es ist die Aufgabe des Risikomanagements, das quantitative Zielsystem abzusichern. Resultierend sollte die ausgewählte Methode quantitative Ausgangsgrößen ermöglichen. Die Ableitung der Risiken sollte durch die Methode mit einem möglichst induktiven Vorgehen eine modulare Vorgehensweise unterstützen.

Die Auswahl der Methode hinsichtlich des mathematischen Modells sowie der Zeitvarianz ist von der Zielstellung der Risikobeurteilung abhängig (vgl. Kap. 4.4). Einerseits ist es erforderlich, das Gesamtrisiko statisch zu einem diskreten Projektzeitpunkt zu bestimmen. Dieses Risiko wird im Folgenden als globale Risikobewertung bezeichnet. Andererseits müssen die Risiken einzelner Projektumfänge innerhalb des Projektverlaufs auch dynamisch berücksichtigt werden, um kostenintensive Beschleunigungsmaßnahmen zu vermeiden. Die Risikobewertung einzelner Projektumfänge wird als lokale Risikobewertung bezeichnet (vgl. Abbildung 27).

Die Notwendigkeit der dynamischen Betrachtung soll im Folgenden exemplarisch an der Verschiebung einer Prüfmaßnahme von der Maschinenvorabnahme auf die Anlageninbetriebnahme infolge nichtvorhandener Testbauteile zur Erprobung, so genannte Klapperteile, erläutert werden. Resultierend werden Mängel erst verspätet im Anlauf festgestellt, was zu Stillständen der Produktion, Nacharbeit oder auch zusätzlichen Reparaturkosten führen kann. Bedingt durch diese mangelnde Berücksichtigung der Wechselwirkung von Entscheidungen, können die Risiken nicht ganzheitlich im Fahrzeugprojekt gesteuert werden.

In Bezug auf den statischen Anwendungsfall muss die Methode dem dynamischen Verhalten der Unsicherheit aufgrund der mit dem Projektfortschritt steigenden Datenverfügbarkeit genügen. Resultierend aus der großen Unsicherheit zu Projektbeginn ist es sinnvoll, die Ausgangsgrößen als Wahrscheinlichkeitsverteilung auszugeben. Folglich muss die Methode neben den statischen Eigenschaften auch stochastische aufweisen. Als Ergebnis sind die Risiken und in der Folge auch die Handlungsalternativen miteinander vergleichbar. Entsprechend diesen Anforderungen genügt einzig die Multivariate Monte-Carlo-Simulation den Anforderungen.

Hingegen wird im zweiten Anwendungsfall ein zeitvariantes System mit bekannten Wirkzusammenhängen betrachtet. Dies erfordert Modelle mit dynamischen Eigenschaften. Bedingt durch den eingegrenzten Betrachtungsumfang gegenüber den globalen Projektrisiken können die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Systemzuständen auch probabilistisch durch Experten geschätzt werden. Dies zieht sowohl die Markow-Analyse, die Stochastischen-Petri-Netze als auch die Baye'sche Netze in die Methodenauswahl. Im Folgenden finden die Baye'schen Netze Anwendung, da diese komplexe Systeme zeiteffizient modellieren, eine intuitive graphische Darstellung bieten und alternative Entscheidungsvariablen definieren (Nagarajan et al. 2013) (Koch 2000).

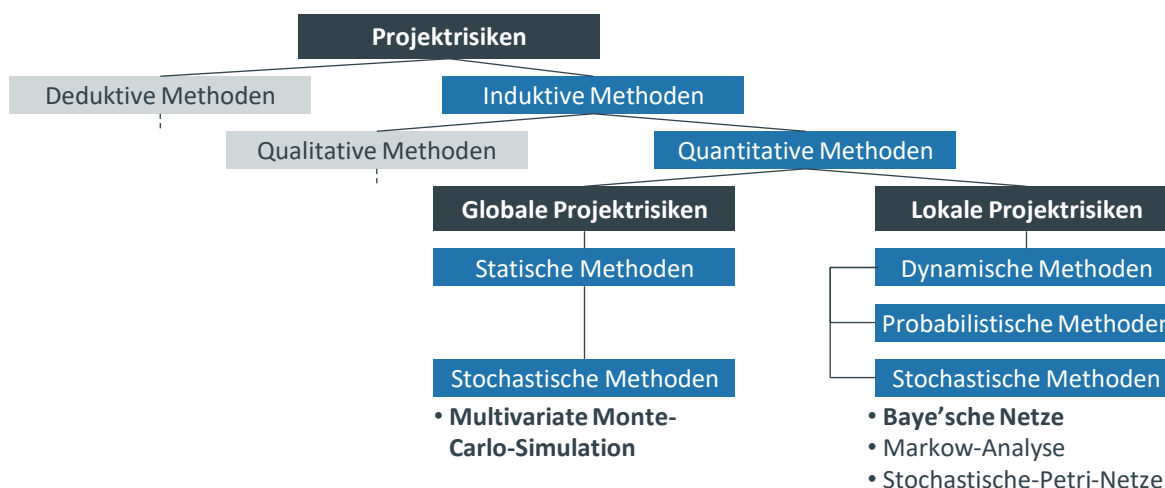


Abbildung 27: Methodenauswahl Projektrisiken

5.1.2 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation hat ein breites Anwendungsspektrum von der strategischen Unternehmensführung über die Betriebswirtschaftslehre bis zur Zuverlässigkeit technischer Systeme (Romeike 2018) (VDI 4008-6). Es ist eine stochastische Simulationmethode zur Ermittlung der Verteilung einer Zielgröße durch wiederholte Berechnung des Modells mittels zufällig gewählter Ausprägungen der Einflussgrößen einer Zielgröße, die über die Ursache-Wirkungsbeziehung in dem Modell mit der Zielgröße i.d.R. deterministisch verknüpft sind (Romeike 2018) (Cottin und Döhler 2013) (Wiggert 2009). Dies ermöglicht Prognosen über das Systemverhalten (Alfen et al. 2010).

Die Monte-Carlo-Simulation basiert auf dem Gesetz der großen Zahlen sowie dem zentralen Grenzwertsatz. Es kann davon ausgegangen werden, dass die durch eine hinreichend große Anzahl ermittelter Zielgrößen, durch voneinander unabhängige und identisch verteilte Zufallszahlen, ermittelte Zielgröße gegen den Erwartungswert der Zielgröße konvergiert (Romeike 2018).

Im ersten Schritt ist das stochastische Modell zu bilden. Zu diesem Zweck wird der funktionale Zusammenhang zwischen den Einflussgrößen sowie der Zielgröße modelliert. Für die Einflussfaktoren sind Verteilungsfunktionen, beispielsweise Compound-, PERT-, Dreiecksverteilung, sowie Ober- und Untergrenzen zu definieren, die ggf. durch Experten geschätzt werden können (Romeike 2018) (Gleißner und Wolfrum 2019). Eine Übersicht gebräuchlicher Verteilungsfunktionen bieten beispielsweise (Alfen et al. 2010) oder (Romeike und Spitzner 2013). Häufig existiert keine ausreichende Datengrundlage zur Ermittlung der Verteilungsfunktionen der Einflussfaktoren. Resultierend müssen Experten die Verteilungsfunktionen der Einflussfaktoren schätzen. Hinausgehend über die Schätzung der Verteilungsfunktionen durch Experten stellt (Greenberg 2014) auf Basis

der Arbeit von (Abramson und Stephen 1990) das szenariobasierte „Relative Risk Weighting-Verfahren“ vor. Dieses unterstützt die Charakterisierung von Risikofaktoren unter Unsicherheit und ermöglicht die Berücksichtigung objektiver und subjektiver Wahrscheinlichkeiten. Kann eine Dreiecksverteilung für die Verteilung angenommen werden, erfolgt die Ableitung mithilfe der Minimal- und Maximalausprägung sowie des wahrscheinlichsten Werts. Zur Aggregation der Ausprägungen aller Merkmalsträger in einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nutzt das Verfahren folgende Teilprozesse:

1. Gewichtung der Merkmalsträger eines Risikos durch einen Paarweisen Vergleich
2. Ermittlung dreier alternativer Risikoszenarien
3. Transformation der ermittelten Risikoszenarien in eine als Dreiecksverteilung modellierte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion
4. Ermittlung der absoluten Risikoausprägung durch die Multiplikation der relativen Werte der Dreiecksverteilung mit einem Basiswert

Die anschließende i.d.R. computergestützte Simulation erfolgt in drei Schritten (Cottin und Döhler 2013, S. 405):

1. Erzeugung hinreichend großer Anzahl an n Simulationen (U_1, \dots, U_n) für jede Komponente Z_i eines Zufallsexperimentes $Z = (Z_1, \dots, Z_n)$
2. Berechnung der Ausgangsgrößen $(X_1 = g(U_1), \dots, X_n = g(U_n))$
3. Statistische Auswertung der Ausgangsgrößen (X_1, \dots, X_n)

Die erzeugten Zufallszahlen werden i.d.R. im Intervall von $[0,1]$ erzeugt und in eine definierte Wahrscheinlichkeitsverteilung überführt (Wiggert 2009). Für korrelierte Einflüsse gilt es, die unkorrelierten Zufallszahlen in korrelierte zu überführen (Deutsch 2004) (König 2008). Die Zufallszahlen bilden die Grundlage der Simulationsberechnung.

Jeder Simulationsdurchlauf erzeugt eine eigenständige Zielgröße durch die zufällige Kombination der Ausprägungen der Einflüsse. Die Ergebnisse jedes Simulationsdurchlaufs werden hinterlegt und die Berechnung wird wiederholt.

Intention der Simulation ist es, dass die Gesamtheit der Iterationen eine repräsentative Stichprobe der Risikoszenarien bietet (Romeike 2018). Mithilfe statistischer Maße können Aussagen bzgl. der Anzahl der erforderlichen Simulationen zur Realisierung eines Konfidenzintervalls getroffen werden. Die Genauigkeit der Analyse ist u.a. von der Anzahl der Wiederholungen abhängig (Alfen et al. 2010) (Wiggert 2009). Abschließend können

Aussagen bzgl. des Einflusses der einzelnen Einflüsse auf die aggregierte Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielgröße, die Dichtefunktion, gegeben werden (Alfen et al. 2010) (Wiggert 2009).

Die weitere Verbreitung der Monte-Carlo-Simulation ist u.a. durch die Möglichkeit der Abbildung komplexer Systeme, der Berücksichtigung veränderter Datenkonstellationen (Denk und Exner-Merkelt 2005) und die Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Methoden begründet (Romeike 2018) (Frey und Nießen 2001). Die Güte der Simulationsergebnisse ist von der Qualität der Eingangsdaten abhängig. Fehlerhafte Schätzungen der Wahrscheinlichkeiten können zu falschen Rückschlüssen führen (Romeike 2018) (Alfen et al. 2010). Die Modellcharakteristika führen dazu, dass folgenschwere Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit nicht ausreichend Berücksichtigung finden (DIN EN 31010). Weiterhin ist mit der Simulation ein nicht unerheblicher Rechen- und Personalaufwand verbunden (Romeike 2018).

5.1.3 Baye'sche Netze

Baye'sche Netze dienen der Modellierung zeitvarianter Systeme, die durch Unsicherheit bzgl. ihres Verhaltens (vgl. Kap. 3.1.1) charakterisiert sind. Die probabilistische Abbildung basiert auf der Wahrscheinlichkeitsauffassung des Mathematikers Thomas Bayes, welche von Pearl erstmals zur Systemmodellierung genutzt wurde (Koch 2000) (Pearl 2013).

Ein Baye'sches Netz ist ein gerichteter azyklischer Graph mit endlich vielen Knotenpunkten, die betrachtungsrelevante Zufallsvariablen abbilden, und einer Menge gerichteter Kanten, welche für jede Relation der Knoten die kausale Verknüpfung darstellen (Pearl 2013) (Koch 2000) (Conrady und Jouffe 2015).

Die kausale Verknüpfung in Form der Kante wirkt von der Ursache, dem Kindknoten, auf einen Effekt, den Eltern- bzw. Zielknoten. Resultierend bilden Kanten die probabilistischen Abhängigkeiten der Zustände zwischen den Eltern- und Kindknoten ab. Diese werden in Form einer Tabelle bedingter Wahrscheinlichkeiten für jeden Kindknoten hinterlegt und visualisieren Ungewissheit (Koch 2000) (Pearl 2013).

Kausal betrachtet determiniert ausschließlich der Zustand der Elternknoten den Zustand des Kindknotens. Es gilt die Markov-Bedingung, welche eine einfache Faktorisierung der gemeinsamen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Knoten innerhalb des Modells zulässt (Kettenregel) (Borth 2004) (Pearl 1988). Die Wahrscheinlichkeit eines Knotens ergibt sich auf Basis von Formel 2 (Pearl 2013):

Formel 2: Wahrscheinlichkeit eines Knoten

$$P = (X_1, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | \text{parents}(X_i))$$

Mit der Modellierung des Graphen und der Definition der A-priori-Wahrscheinlichkeiten kann mit der Berechnung der Ausgangsgrößen begonnen werden (Koch 2000). In diesem Zusammenhang können verschiedene Lösungsverfahren genutzt werden (Darwiche 2008). Die Auswahl des Lösungsalgorithmus ist für diese Arbeit nicht relevant. Es genügt ein exaktes Verfahren (Rauschenbach 2017). Bedingt durch die Praktikabilität der Software Geni (BayesFusion) findet im Folgenden der Clustering-Algorithmus für die Berechnung der Baye'sche Netze Anwendung (Lauritzen und Spiegelhalter 1988).

Für die Simulation dynamischer Prozesse wird der Zeitraum in eine endliche Anzahl diskreter Zeitschritte unterteilt. Diesen werden A-priori-Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Ereignisse zum jeweiligen Zeitpunkt t zugeordnet (Conrady und Jouffe 2015).

Weitere Erläuterungen der Baye'sche Netze finden sich beispielsweise in (Darwiche 2008). Die Baye'schen Netze werden insbesondere zur Diagnose technischer Systeme bzw. zur Entscheidungsunterstützung genutzt (Rauschenbach 2017) (Borth 2004). Als vorteilhaft hat sich u.a. die Effizienz der Inferenz-Algorithmen erwiesen. Die Methode bietet ein intuitives Verständnis bei der gleichzeitigen Möglichkeit, komplexe Systeme abzubilden. Weiterhin können Baye'sche Netze aus Daten lernen (Borth 2004).

5.1.4 Prozess- und Produktrisiken

Neben den Projektrisiken sind auch die Risiken für den Prozess sowie das Produkt mithilfe geeigneter Methoden zu bewerten. Die Risiken bzgl. des Fertigungsprozesses sowie des Produkts besitzen im Gegensatz zu den Projektrisiken einen qualitativen Charakter. Die Objektivität der Risiken des zu fertigenden Produkts innerhalb des Fertigungsprozesses durch monetäre Kennzahlen ist nicht gegeben. In Analogie zu den Projektrisiken sind auch für die Produkt- und Prozessrisiken induktive Methoden im Sinne der Wiederverwendung zu bevorzugen. Resultierend ergibt sich folgende Methodenauswahl für die Bewertung der Produkt- sowie Prozessrisiken (vgl. Abbildung 28).

Für die Bewertung der Prozess- sowie Produktrisiken findet in dieser Arbeit die Failure Mode and Effects Analysis, auch als Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse bzw. Fehlerzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) bezeichnet (vgl. Kap. 5.1.5), Anwendung. Die Expertenbefragung nutzt analog den Risikomatrizen Elemente der FMEA. Intention der PAAG-Methode und SWIFT-Analyse ist lediglich die Bewertung der Risiken

mit primärem Einfluss. Im Rahmen der Wiederverwendung dieser Bewertungen kann es zum Unterschlagen von Risiken kommen. Häufig sind diese Methoden der FMEA vorgeschaltet. Gegenüber der Szenarioanalyse wurde der modulare Einsatz der FMEA bereits nachgewiesen (vgl. Kap. 4.8).

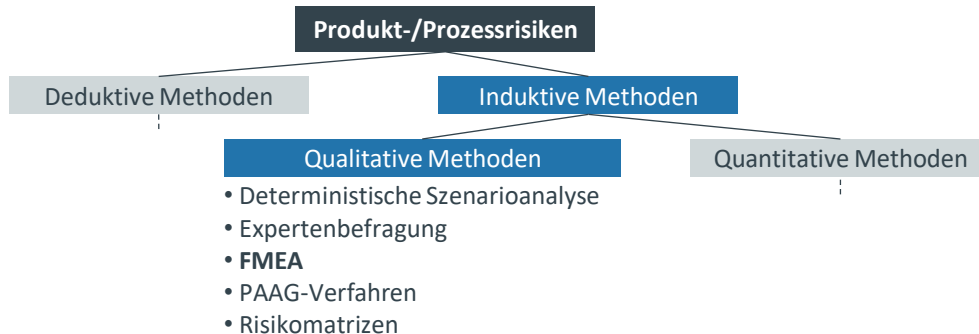


Abbildung 28: Methodenauswahl Produkt- und Prozessrisiken

5.1.5 Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

Die FMEA ist eine systematische und teamorientierte Methode zur entwicklungs- und planungsbegleitenden präventiven Risikominimierung von Systemen bzw. Prozessen (DIN EN 60812) (Eberhardt 2008) (VDA 4-2). Die Methode ist ursprünglich für die Risikobeurteilung technischer Systeme im Kontext des Militärs bzw. der Luft- und Raumfahrt konzipiert. Heute empfehlen viele Richtlinien die Anwendung der Methode. In einigen Bereichen, wie beispielsweise der Automobilindustrie, ist der Einsatz einer FMEA verbindlich vorgeschrieben (VDA 6-1) (VDA 4-2) (DIN EN 60812) (IATF 16949) (Romeike 2018).

Es ist im Allgemeinen zwischen der Produkt- sowie Prozess-FMEA zu differenzieren. Während die Risikominimierung der Produkt-FMEA auf die „geforderten Funktionen von Produkten und Systemen bis auf die Auslegung der Eigenschaften und Merkmale“ abzielt, betrachtet die Prozess-FMEA „alle Abläufe zur Herstellung von Produkten und Systemen bis zu den Anforderungen und den Prozesseinflussfaktoren“ (VDA 4-2, S. 15). In Abhängigkeit vom Betrachtungsgegenstand sowie -zeitraum innerhalb des Produktlebenszyklus (vgl. Kap. 2.2) existiert eine Vielzahl an FMEA-Ausprägungen, wie z.B. die Betrachtung von Systemen, Softwarefunktionen, Schnittstellen, Konstruktionen, Komponenten, Fertigungsabläufen, Montageabläufen, Logistik, Transport, Maschinen und Kundenbetrieb (VDA 4-2) (Romeike 2018) (DIN EN 60812). Dabei zeigt sich, dass FMEAs der einzelnen Lebensphasen eines Systems über Kausalketten verbunden sind (vgl. Kap. 2.2 und (VDA 4-2)).

Das Vorgehen innerhalb einer FMEA ist in Abbildung 29 visualisiert. Vor der interdisziplinären Risikoidentifizierung und -analyse ist die FMEA vorzubereiten, u.a. sind die Teamdefinition und Sichtung der Arbeitsunterlagen sowie die Grenzen des betrachteten Systems zu definieren. Die FMEA identifiziert und analysiert mögliche Fehler, deren Ursachen sowie Folgen systematisch. Während die Analysen in der Vergangenheit i.d.R. mit einem Formblatt durchgeführt wurden, werden diese heute häufig rechnergestützt grafisch realisiert. Für die systematische Analyse definieren die (VDA 4-2) bzw. (DIN EN 60812) eine Strukturanalyse zur Erfassung der beteiligten Elemente. Hierdurch ergibt sich auch die Möglichkeit der Wiederverwendung von Elementen (vgl. Kap. 4.8). Mit der Zuordnung von Funktionen zu den Strukturelementen und der Verknüpfung der Funktionen entsteht eine Funktionsübersicht des Systems (Übersicht der Funktionalität des Produkts bzw. der Abläufe im Prozess) bzw. einer Ursache-Wirkungsbeziehung. Dieses Geflecht bildet die Grundlage der Fehleranalyse, bei der den Funktionen und der Systemstruktur Fehlfunktionen zugeordnet und die Fehlfunktionen anschließend verknüpft werden. In der Maßnahmenanalyse werden den Fehlern die aktuellen Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen zugeordnet. Anschließend sind die Risiken im Expertenteam mithilfe der Faktoren (VDA 4-2) (Romeike 2018) (DIN EN 60812):

- der **Bedeutung** der Fehlerfolge B (auch als S für „Severity“ bezeichnet),
- der **Auftretenswahrscheinlichkeit** der Fehlerursache (auch als O für „Occurrence“ bzw. P für „Probability“ bezeichnet) und
- der **Entdeckungswahrscheinlichkeit** des Fehlers (auch als D für „Detection“ bezeichnet) zu bewerten.

Die Faktoren sind in der Regel auf den Bereich 1 bis 10 normiert. Die Höhe des Handlungsbedarfs der Bewertungsfaktoren wird auf einer Skala von 1 bis 10 mithilfe eines vordefinierten Bewertungskataloges abgebildet. Die ursprüngliche Bewertung der Risiken mittels Risikoprioritätszahl (RPZ) durch die Multiplikation der drei Faktoren ist nicht zielführend, da diese keine objektive Aussage ermöglicht und die Risiken untereinander nicht vergleichbar sind (VDA 4-2) (Werdich 2012) (Romeike 2018). Die Höhe der Risikoprioritätszahl gibt Auskunft über die Priorität von Verbesserungsmaßnahmen. Hierbei subsumieren höhere Risikoprioritätszahl-Werte eine größere Dringlichkeit als niedrige. Zur Lösung dieser Problematik werden Risikomatrizen (vgl. Abbildung 23) genutzt ($B \times A$ = Produktrisiko, $B \times E$ = Verifizierungsrisiko, $A \times E$ = Durchschlupfrisiko) (Romeike 2018), die eine Aussage bzgl. der Klassifizierung des Risikos hinsichtlich des Handlungsbedarfs ermöglichen.

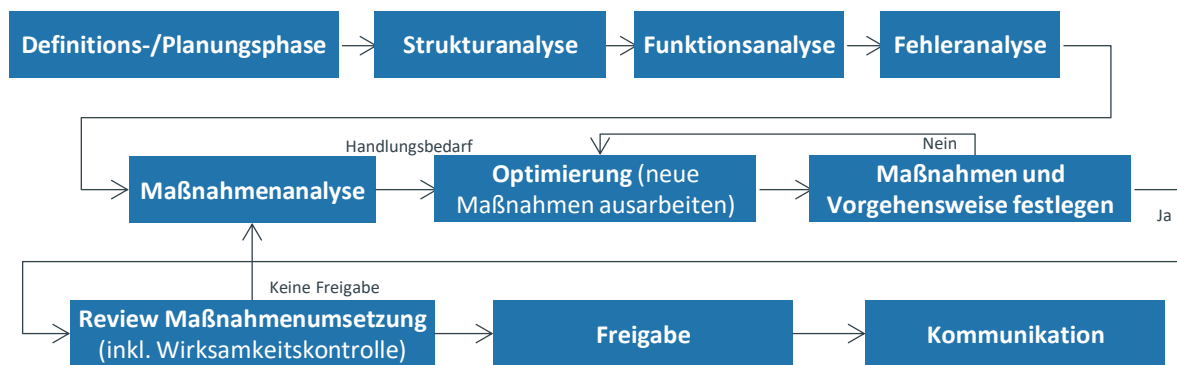


Abbildung 29: Vorgehensmodell zur Durchführung einer FMEA (VDA 4-2, S. 17)

Analog dem Risikomanagementprozess erfolgt anschließend ggf. die Definition von Maßnahmen zur Risikominimierung zwecks einer Optimierung der Risikoposition. In diesem Zusammenhang müssen die Risiken nach der Realisierung der vorgeschlagenen möglichen Maßnahmen bewertet werden. Auf dieser Basis werden nun die erarbeiteten Maßnahmen des Teams zur Entscheidung gebracht. Im Rahmen der Umsetzung der Maßnahmen müssen die bewerteten Risiken verifiziert und validiert werden. Im Rahmen des Risikomanagementprozesses werden die Risiken über den Produktlebenszyklus durch die FMEA-Methodik gemonitort (DIN EN 60812) (VDA 4-2) (Romeike 2018).

Neben der Risikominimierung und Steigerung der Funktionssicherheit bzw. Zuverlässigkeit von Produkten und Prozessen verfolgt die FMEA die Intention, den Umgang mit Risiken zu dokumentieren sowie die Risiken zu kommunizieren, und dient damit dem Wissensmanagement (VDA 4-2) (DIN EN 60812) (DIN EN ISO 9000) (IATF 16949).

Die weite Verbreitung der FMEA ist u.a. durch die Möglichkeit der umfassenden und systematischen Systemanalysen bei gleichzeitiger Berücksichtigung qualitativer Eingangsgrößen durch die Quantifizierung der Faktoren bedingt. Gleichzeitig können durch die Multiplikation der ordinal skalierten Bewertungsfaktoren Unstimmigkeiten entstehen und der mit der Methode verbundene, nicht unerhebliche Ressourcen- sowie Zeitaufwand (Romeike 2018) (DIN EN 60812) (VDA 4-2). Letzterer kann durch modulare Ansätze (vgl. Kap. 4.8) erheblich reduziert werden.

5.2 Potentiale für die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen

Auf Basis der Methodenauswahl für die Risikobewertung (vgl. Kap. 5.1) gilt es im Folgenden, die Methoden innerhalb der Kausalkette für die Risikobeurteilung bei der

Wiederverwendung von Entwurfselementen zu evaluieren. Die Ergebnisse der zu konzipierenden Risikobeurteilungsmethoden müssen der Entscheidungsfindung im Anlagenengineering genügen. Resultierend detaillieren sich die Forschungsfragen.

5.2.1 Potentiale der Risikobewertung bei der Wiederverwendung

Für den gegebenen Untersuchungsgegenstand der Projektrisiken genügen die bestehenden Bewertungsmethoden den Anforderungen. Die Forschungsfrage ist in die statische und dynamische Risikobewertung im Projekt zu differenzieren.

Wie können die Risiken von Realisierungsoptionen zu einem diskreten Projektzeitraum bestimmt werden?

Wie können die Wechselwirkungen von Entscheidungen dynamisch innerhalb des Betriebsmittelprojektes bewertet werden?

Für die Lösung der Forschungsfragen finden die Monte-Carlo-Simulation und die Baye'schen Netze Anwendung, welche sich bereits für die Risikobeurteilung von Projekten etabliert haben (vgl. (Steiger 2009) (Schlickerrieder 2016), (Rauschenbach 2017), (Hill 2012)). Im Folgenden stehen die Aufbereitung der Eingangsdaten (vgl. Kap. 5.2.3) und deren Modellierung bei der Risikoanalyse im Fokus (vgl. Kap. 5.2.2).

In der klassischen FMEA zur Bewertung der Produkt- sowie Prozessrisiken wird die Risikoprioritätszahl für die Aggregation der Bewertungsfaktoren zur Risikobewertung herangezogen. Die Risikoprioritätszahl wird heute nicht mehr empfohlen (vgl. Kap. 5.1.5), da diese den Voraussetzungen für die Risikobewertung nicht hinreichend genügt (vgl. Kap. 4.4). Insbesondere erfüllt die Risikoprioritätszahl nicht das Kriterium der Vergleichbarkeit, denn gleiche Risikoprioritätszahl-Werte beinhalten unterschiedliche Risiken. Weiterhin verhält sich die Risikoprioritätszahl nicht linear. Es besteht somit keine Kausalität, bei welchem Risikoprioritätszahl-Wert Handlungsbedarf besteht. Für die Bedeutung des Risikos muss somit neben den absoluten Risikoprioritätszahl-Werten auch die Kombination der Bewertungsfaktoren berücksichtigt werden. Resultierend variiert die Risikobewertung zwischen den FMEA-Teilnehmern trotz gleicher Bewertung der Ausprägung der Risikofaktoren A, B und E (vgl. Tabelle 5).

Infolge des Bedarfs an einer objektiven und vergleichbaren Risikobewertung für ein effizientes Risikomanagement sind verschiedene Bewertungsansätze in der Wissenschaft und Praxis entstanden (vgl. z.B. (VDA 4-2) (Werdich 2012) (König 2008)). Grundlage dieser Bewertung bildet die VDA-Risikomatrix der Produkt-FMEA (vgl. Abbildung 23) mit

einer firmen- bzw. projektspezifischen Risikoklassifizierung. In der ursprünglichen Ausprägung bestehen drei Risikoklassen, die farblich voneinander abgegrenzt werden. Ein Bewertungsfaktor wird bei der Bewertung mittels Risikomatrizen jedoch unterschlagen. Im Beispiel der Produkt-FMEA-Matrix ist dies die Entdeckungswahrscheinlichkeit, welche für die Risikobewertung des Prozesses essenziell ist. Resultierend werden mögliche Risiken überbewertet, da diese noch innerhalb des Fertigungsprozesses entdeckt werden, folglich nicht zum Kunden gelangen und somit geringere Folgen haben.

Tabelle 5: Interpretation von Risikoprioritätszahl-Werten (Linß 2005, S. 411)

Bewertung				Fehleraussage	Maßnahme
A	B	E	RPZ		
1	1	1	1	Idealfall (Ziel)	nein
1	1	10	10	Sichere Beherrschung, keine Kontrolle notwendig	nein
1	10	1	10	Fehler erreicht nicht den Kunden	nein
10	1	1	10	Häufiger Fehler mit geringer Bedeutung, der gut zu entdecken ist	ja
1	10	10	100	Fehler wird vom Kunden bemerkt, Auftreten ist unwahrscheinlich	nein
10	1	10	100	Häufiger Fehler, der den Kunden erreicht, ihm aber nicht wichtig ist	fraglich
10	10	1	100	Häufiger Fehler mit großer Bedeutung, der gut zu entdecken ist	ja
10	10	10	1000	Konzeptfehler	ja

(König 2008) beschreibt einen Risikowürfel, der neben der Auftretenswahrscheinlichkeit und der Fehlerbedeutung auch die Fehlerentdeckung berücksichtigt. Infolge der Halbierung der Skalen bildet sich ein Würfel mit acht Quadranten. Die Risikobewertung ergibt sich durch die Zuordnung des Risikos zu einem dieser Quadranten. Die resultierende Risikobewertung ist jedoch grob und häufig nicht plausibel (Röpke et al. 2015). Beispielsweise geht mit der Erhöhung der Bewertungsfaktoren um eine Einheit ein Wandel des Risikos vom kleinsten Handlungsbedarf zum größten Handlungsbedarf einher. Weiterhin existieren spezifisch abgeleitete Risikokuben, wie z.B. (Landschoof 2015), die i.d.R. jedoch keine allgemein konsistente Bewertung ermöglichen.

In der Praxis findet weiterhin der 3D-Ampelfaktor Anwendung (Werdich 2012). Die Risikobewertung ergibt sich aus der Quersumme der Matrizen A/B, E/B sowie A/E. Analog zur VDA-Matrix entstehen drei Risikoklassen, wobei für die Berechnung der Quersumme die Zahlen 0 für den grünen, 1 für den gelben Bereich sowie 2 für den roten Bereich vergeben werden. Der Handlungsbedarf ergibt sich aus der Höhe der Quersumme.

Die vorgestellten Bewertungsansätze für die Prozess-FMEA bewerten die Risiken projekt- sowie firmenspezifisch. Für die Definition dieser Grenzwerte bzw. der Kombinatorik

für die Risikoklassen, die eine Objektivität sowie Vergleichbarkeit ermöglicht, existiert jedoch keine allgemeine Handlungsempfehlung. Resultierend gilt es im Folgenden, einen Bewertungsansatz für Prozessrisiken zu finden, der die Vergleichbarkeit der Risiken garantiert.

„Wie können die Prozessrisiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen objektiv bewertet werden?“

5.2.2 Potentiale der Risikoanalyse bei der Wiederverwendung

Der Einsatz der Monte-Carlo-Simulation für die globale Risikoanalyse setzt eine Analyse der Einflussgrößen (vgl. Kap. 5.2.1) voraus. Hierfür kann das „Relative Risk Weighting-Verfahren“ (vgl. Kap. 5.1.2) genutzt werden.

Im Rahmen der lokalen Risikoanalyse sind einzelne kritische Projektumfänge zu bewerten. Für die Bewertung und Modellierung kommen die Baye'schen Netze zur Anwendung (vgl. Kap. 5.1.3). Das Modell der Baye'schen Netze muss die Interdependenzen der Einflussfaktoren, wie die exemplarische Risikosituation in Abbildung 30, abbilden können.

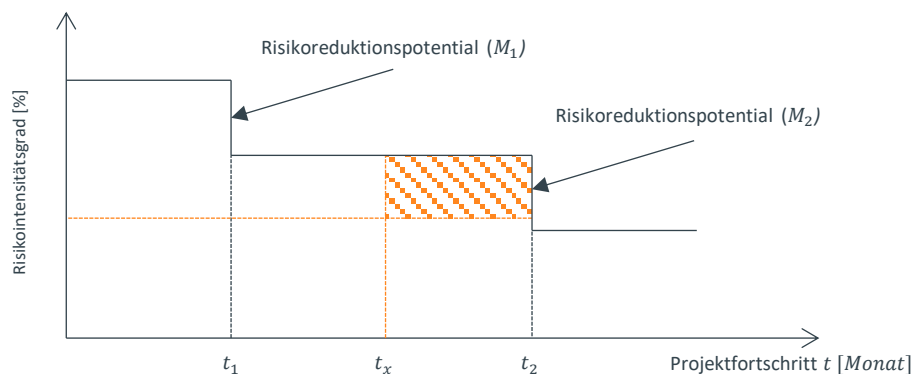


Abbildung 30: Analyse dynamisches Projektrisiko

Ein kritischer Projektumfang wird mithilfe der Maßnahme M_1 sowie M_2 zu den Zeitpunkten t_1 sowie t_2 abgesichert. Es gilt die Annahme, dass identifizierte Abweichungen behoben werden. Die horizontale Achse bildet den Zeitverlauf des Betriebsmittelprojekts ab. Hingegen visualisiert die vertikale Achse die aggregierte Risikointensität. Die Risikoakzeptanzschwelle ab dem Zeitpunkt t_x ist rot dargestellt.

Maßnahme M_1 reduziert das Risiko und führt ggf. zu Anlagenanpassungen. Es können jedoch nicht alle Abweichungen mit der Maßnahme M_1 identifiziert werden, sodass noch ein Restrisiko bestehen bleibt. Ab dem Zeitpunkt t_x im Projektverlauf bestehen schwerwiegende Abweichungsfolgen. Die Maßnahme M_2 reduziert zwar die Risikointensität, jedoch zu spät, da die Risikoakzeptanzschwelle zum Zeitpunkt t_x überschritten ist.

Resultierend stellt sich folgende Frage in Bezug auf das Modell der Baye'schen Netze:

Welches Risikomodell ist für die Abbildung der Interdependenzen innerhalb eines Betriebsmittelprojektes geeignet?

Für die Risikobewertung von Prozessen wurde die FMEA ausgewählt (vgl. 5.1.4). Diese Methodik bietet gleichzeitig eine hinreichende Risikoanalyse hinsichtlich der Bewertungsfaktoren Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung der Fehlerfolge und Entdeckungswahrscheinlichkeit für die Risikobewertung (vgl. Kap. 5.1.5).

5.2.3 Potentiale der Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung

Die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen dient der Erfassung aller relevanten Risiken für die Ressource. Potentielle Fehlerursachen sollen möglichst umfassend, systematisch sowie präventiv erfasst werden. Bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen liegen die Erfahrungen mit vorherigen Entwurfselementen i.d.R. vor. Das Verhalten eines Systems wird durch seine Elemente sowie deren Struktur und Eigenschaften determiniert (vgl. Kap. 2.1). In diesem Zusammenhang ergibt sich die Forderung an die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung, die Änderung der relevanten Einflüsse, die Risiken induzieren können, zu erkennen.

Die unsystematischen Risikoidentifizierungsmethoden (vgl. Kap. 4.2) eignen sich mit der unsystematischen Dokumentation nur bedingt für die Risikoidentifikation bei der Wiederverwendung. Intention ist die Nutzung gesammelten Wissens während des Engineerings zur Minimierung der Risiken für das Realisierungsprojekt und die Erhöhung des Reifegrades der Ressourcen. Im Sinne des PPR-Modells (vgl. Kap. 2.1.1) ergeben sich aus der Ressourcensicht Schnittstellen zu anderen Produktionsressourcen, zum Produkt sowie zum Fertigungsprozess, welche jeweils Einfluss auf die Ressource nehmen können. Diese gilt es systematisch zu erfassen.

Grundvoraussetzung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering ist das Produkt mit dem dazugehörigen Produktionsprozess. Vor der Wiederverwendung von Entwurfselementen muss das neu zu fertigende Produkt auf seine relevanten Merkmale untersucht werden.

Wie können die Risiken durch neue Produkte bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert werden?

Weitere Abweichungen bzgl. der Einflüsse auf die Produktionsressource können aus einem neuen örtlichen Bezug der Ressource hervorgehen. Folglich müssen die relevanten

Anforderungen der Ressource an die Umgebung, die Risiken verursachen können, erfasst werden. Die relevanten Anforderungen können sich hierbei nicht nur standortübergreifend, sondern auch standortintern unterscheiden. Die Mehrheit der Produktionsstandorte, in die neue Ressourcen eingerüstet werden, sind Brownfield-Fabriken, die sich hinsichtlich ihrer Struktur und Fabrikelemente unterscheiden. Auch die Fabrikumwelteinflüsse, wie z.B. die Luftfeuchtigkeit oder die Temperatur, divergieren. Folglich unterscheiden sich die Einsatzbedingungen erprobter Ressourcen auch bei Greenfield-Standardfabriken, welche bedingt durch das volatile Umfeld i.d.R. auch einen evolutionären Charakter hinsichtlich ihrer Struktur und Elemente aufweisen. Folglich sollten die divergierenden Einflüsse zukünftiger Ressourcen-Standorte hinsichtlich ihrer Risikopotentiale überprüft werden.

Wie können die Risiken durch neue Anlagenstandorte identifiziert werden?

Abschließend können relevante Änderungen auch von Elementen der Ressource ausgehen. Diese Änderungsumfänge sind jedoch im Rahmen eines Änderungsmanagements identifizierbar (vgl. (Lauenroth et al. 2016) (Vogel-Heuser et al. 2017b)). Anschließend müssen diese analysiert und bewertet werden.

Abgeleitet aus dem Risikomodell der globalen und lokalen Projektrisiken ergeben sich verschiedene Einflussgrößen, die es zu berücksichtigen gilt (vgl. Kap. 5.2.2). In Abhängigkeit von der Risikoart variieren die Einflussgrößen. Für die Konzeption der Risikobeurteilungsmethode müssen diese determiniert werden.

Welche Einflussgrößen müssen für die Abbildung der Projektrisiken determiniert werden?

Bedingt durch die divergierenden Rahmenbedingungen bei der Wiederverwendung, müssen für neue Projekte die Risikoidentifizierungsmethoden erneut durchlaufen werden und die Ergebnisse vorheriger Risikoidentifizierungsmethoden bzgl. ihrer Relevanz gefiltert werden. Mit diesen Aktivitäten gehen nicht unerhebliche Aufwendungen einher. Darüber hinaus kann Wissen aus vorherigen Projekten zumeist nicht vollständig Einfluss für Folgeprojekte finden. Im Folgenden ist eine Methode für die Risikoidentifizierung zu konzipieren, welche den Aufwand für die Erfassung der Anforderungen aus dem Fertigungsprozess an die Ressource bei der Wiederverwendung reduziert und das Wissen projektübergreifend nutzbar macht. Gleichzeitig sind die Anforderungen des Fertigungsprozesses an die Ressource möglichst detailliert zu erfassen. In diesem Zusammenhang sind auch die Verkettungen der Teilprozesse auf Arbeitsebene abzubilden.

Wie kann der Aufwand für die Risikoidentifizierung bzgl. des Fertigungsprozesses bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering reduziert werden?

5.2.4 Struktur als Voraussetzung zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung

Die Ressourcenstruktur bildet die Grundlage für die systematische Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering (vgl. Kap. 2.1.3). Für den Anwendungsfall bedingt dies die Ableitung einer einheitlichen Anlagenstruktur für die variantenreiche Fließfertigung in der Automobilproduktion. In Hinblick auf die verschiedenen Engineering Aktivitäten über den Produktlebenszyklus variieren die Anforderungen an die Struktur der Anlagen (Lüder et al. 2017b). Die Einführung des RAMI 4.0 und der damit verbundenen Industrie 4.0-Komponente ermöglichen die Berücksichtigung der Anforderungen verschiedener Lebenszyklen sowie die daraus resultierende lebensphasenübergreifende Nutzung der erzeugten Informationen (vgl. Kap. 2.2 und 2.3). Das RAMI 4.0 zielt auf die Charakterisierung der Anlagenstruktur aus Automatisierungssicht ab. In diesem Zusammenhang werden jedoch nicht die prozesstechnischen Abläufe innerhalb von Produktionssystemen abgebildet. Es ist unklar, welche Ebenen aus funktionaler Sicht für die Risikobeurteilung von Anlagen erforderlich sind und wie diese Ebenen zu identifizieren sind. Hieraus resultieren folgende Forschungsfragen:

Was sind relevante Ebenen für Industrie 4.0-Komponenten von Fertigungssystemen und wie definieren sie sich?

Welche Informationen sollten auf den verschiedenen Ebenen in der virtuellen Repräsentation der Industrie 4.0-Komponente für die Risikobeurteilung verfügbar sein?

5.3 Zusammenfassung der Forschungsfragen

Aus der Konkretisierung der Forschungsfragen in diesem Kapitel in Bezug auf die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering ergibt sich der in Abbildung 31 dargestellte Handlungsbedarf. Die Nummerierung der zu beantwortenden Forschungsfragen leitet sich aus dem Schalenmodell ab.

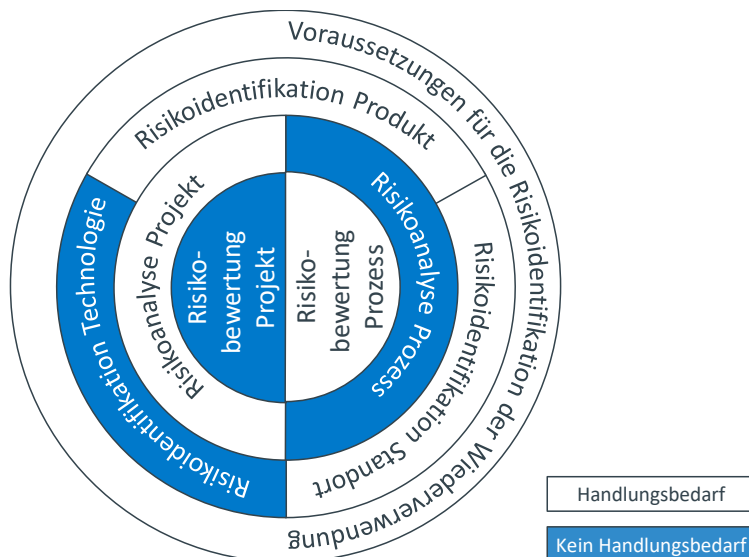


Abbildung 31: Handlungsbedarf für die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering

Für eine schlanke Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering müssen eingangs die Voraussetzungen für die Identifizierung von Risiken geschaffen werden. In diesem Zusammenhang gilt es, folgende Fragen zu beantworten:

1. „Was sind relevante Ebenen für Industrie 4.0-Komponenten von Fertigungssystemen und wie definieren sie sich?“
2. „Welche Informationen sollten auf den verschiedenen Ebenen in der virtuellen Repräsentation der Industrie 4.0-Komponente für die Risikobeurteilung verfügbar sein?“

Hinsichtlich der Risikoidentifizierung gilt es die relevanten Abweichungen in Bezug auf die wiederzuverwendenden Ressourcenelemente zu identifizieren. Diese ergeben sich aus den Umweltbedingungen der Anlage, den zu fertigenden Produkten sowie den Anlagenelementen selbst, wobei letztere durch den Änderungsmanagementprozess bereits abgedeckt werden. Für die Projektrisiken müssen weiterhin relevante Kennzahlen ermittelt werden. Resultierend sind die folgenden Forschungsfragen zu beantworten:

3. Wie kann der Aufwand für die Risikoidentifizierung bzgl. des Fertigungsprozesses bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering reduziert werden?
4. Wie können die Risiken durch neue Anlagenstandorte identifiziert werden?
5. Wie können die Risiken durch neue Produkte bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert werden?
6. Welche Einflussgrößen müssen für die Abbildung der Projektrisiken determiniert werden?

Die identifizierten Abweichungen gilt es im nächsten Schritt für die anschließende Risikobewertung zu analysieren. In Abhängigkeit von der Zielsetzung der Risikobewertung sind die Risikoanalysen zu differenzieren. Während für die qualitative Bewertung des Fertigungsprozesses auf bestehende Risikoanalysen zurückgegriffen werden kann, besteht für die lokale Risikoanalyse quantitativer Daten für Projekte noch Forschungsbedarf:

7. Welches Risikomodell ist für die Abbildung der Interdependenzen innerhalb eines Betriebsmittelprojektes geeignet?

Abschließend gilt es die analysierten Risiken zu bewerten. Die bestehenden Methoden zur Risikobewertung der Prozessrisiken berücksichtigen die Entdeckungswahrscheinlichkeiten innerhalb des Prozesses nur bedingt. Resultierend gilt es, folgende Fragestellung zu beantworten:

8. „Wie können die Prozessrisiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen objektiv beurteilt werden?“

Für die Bewertung der Projektrisiken können bestehende Bewertungsmethoden genutzt werden. Im Kontext der Konzipierung einer Gesamtmethode für die Risikobeurteilung wird die Anwendung dieser im Folgenden dargestellt.

Bei der Bewertung von Projektrisiken muss die Dynamik dieser berücksichtigt werden.

9. Wie können die Wechselwirkungen von Entscheidungen dynamisch innerhalb des Betriebsmittelprojektes bewertet werden?

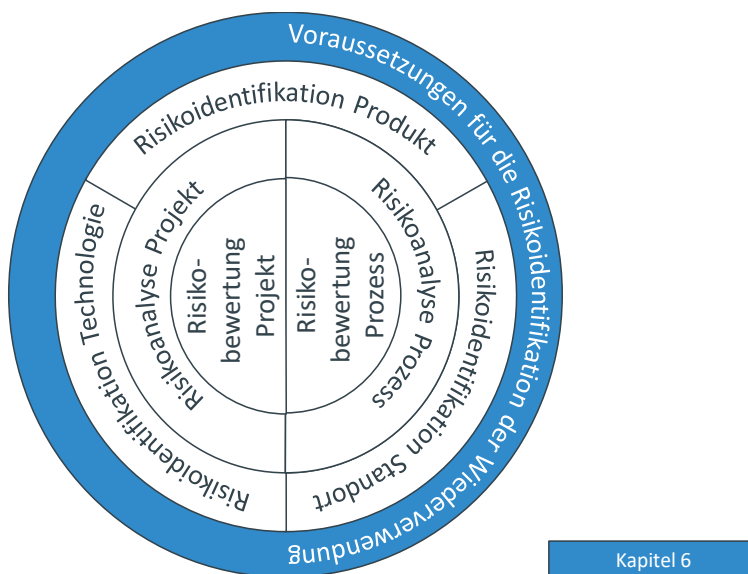
Die Informationssicherheit steigt hierbei i.d.R. mit dem Projektfortschritt, jedoch muss bereits zu Projektbeginn eine grobe Abschätzung erfolgen:

10. Wie können die Risiken von Realisierungsoptionen zu Projektbeginn bestimmt werden?

In der weiteren Abhandlung werden die identifizierten Forschungsfragen sukzessiv beantwortet. Resultierend ergibt sich eine Empfehlung für die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage (vgl. Kap. 1.2).

6 Voraussetzungen für die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung

Dieses sowie die folgenden Kapitel dienen zur Beantwortung der zentralen Forschungsfragen. Hierfür wird das aus der Konkretisierung der Forschungsfragen im fünften Kapitel hervorgegangene Schalenmodell sukzessiv von außen nach innen beantwortet. Im Fokus dieses Kapitels steht die Schaffung der Voraussetzungen für die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering (vgl. Abbildung 32). Die erarbeiteten Module zur Risikobeurteilung der folgenden Kapitel fußen auf diesen Erkenntnissen.



Kapitel 6

Abbildung 32: Einordnung des Kapitels 6 in den Forschungskontext

Die Struktur der Entwurfsartefakte bildet die Basis für deren Wiederverwendung. Zu diesem Zweck werden im ersten Unterkapitel die relevanten Ebenen für die Risikobeurteilung auf Basis einer Literaturanalyse identifiziert. Die Ableitung orientiert sich am Kontext der Fertigung in der Automobilindustrie. Es wird damit folgende Frage beantwortet:

1. „Was sind relevante Ebenen für Industrie 4.0-Komponenten von Fertigungssystemen und wie definieren sie sich?“

Abschließend erfolgt eine Charakterisierung der identifizierten Ebenen zur Beantwortung der zweiten Forschungsfrage.

2. „Welche Informationen sollten auf den verschiedenen Ebenen in der virtuellen Repräsentation der Industrie 4.0-Komponente für die Risikobeurteilung verfügbar sein?“

6.1 Anlagenstruktur

Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage wurde ein iteratives Vorgehen ausgewählt. Eingangs erfolgen eine Literaturanalyse sowie eine Untersuchung bestehender Produktionen in der Automobilindustrie bzgl. der Strukturierung von Fertigungssystemen. Eine Validierung und ggf. eine Anpassung in Bezug auf verschiedenste industrielle Fertigungssysteme schließt sich an (Röpke et al. 2016). Die gewonnenen Erkenntnisse in Bezug auf die Automobilindustrie werden im Folgenden dargestellt.

Die Strukturierung technischer Systeme kann unter verschiedenen Aspekten (vgl. Kap. 2.1.3) erfolgen. Trotz divergierender Sichtweisen haben die verschiedenen Ansätze gemein, dass alle charakterisierten Ebenen funktionale Eigenschaften besitzen bzw. je Ebene spezifische Funktionen erbringen und in diesem Zusammenhang eine Bedeutung für das Fertigungssystem haben (Röpke et al. 2016). Dies gilt auch lebensphasenübergreifend (Lüder et al. 2017b), wobei neben der technischen Funktionalität in Bezug auf die Industrie 4.0-Komponente auch weitere Kriterien, wie z.B. die Steuerungsarchitektur (Zawisza et al. 2016), herangezogen werden können. Auf Basis des dominierenden Kriteriums der technischen Funktionalität wurden spezifische Ebenen für Produktionssysteme (vgl. Abbildung 33) der Automobilindustrie identifiziert (Lüder et al. 2017b) (Röpke et al. 2016) (Zawisza et al. 2016). Der funktionale Anteil der Objekte kann direkt und indirekt wertschöpfende Funktionalitäten umfassen.

Das Konstruktionselement stellt die kleinste sinnvoll zerlegbare Einheit eines Produktionssystems dar. Mithilfe der Konstruktionselemente wird die Funktionalität von Komponenten sichergestellt. Auch wenn diese an der Wertschöpfung beteiligt sein können, ist eine isolierte Wertschöpfung nicht möglich. Resultierend können Konstruktionselemente Produktmerkmale beeinflussen. In Abhängigkeit von der Art eines Konstruktionselementes kann dieses ggf. auch Zustände liefern, eine eigenständige Kommunikation ist jedoch nicht möglich. Folglich lässt sich die Ebene der Konstruktionselemente nicht durch Steuerungsgrößen charakterisieren.

Auf der Ebene der Komponenten ist zwischen Prozess- sowie Steuerungskomponenten zu differenzieren. Während Steuerungskomponenten Signale verarbeiten sowie weiterleiten, wie beispielsweise reine Diagnosekomponenten, sind Prozesskomponenten Teil des Produktionsprozesses. Steuerungskomponenten sind somit nicht wertschöpfend. Hingegen untergliedern sich Prozesskomponenten in wertschöpfende, direkt qualitätswirksame Bestandteile sowie nicht wertschöpfende Bestandteile, die ggf. auch qualitätswirksam sein können.

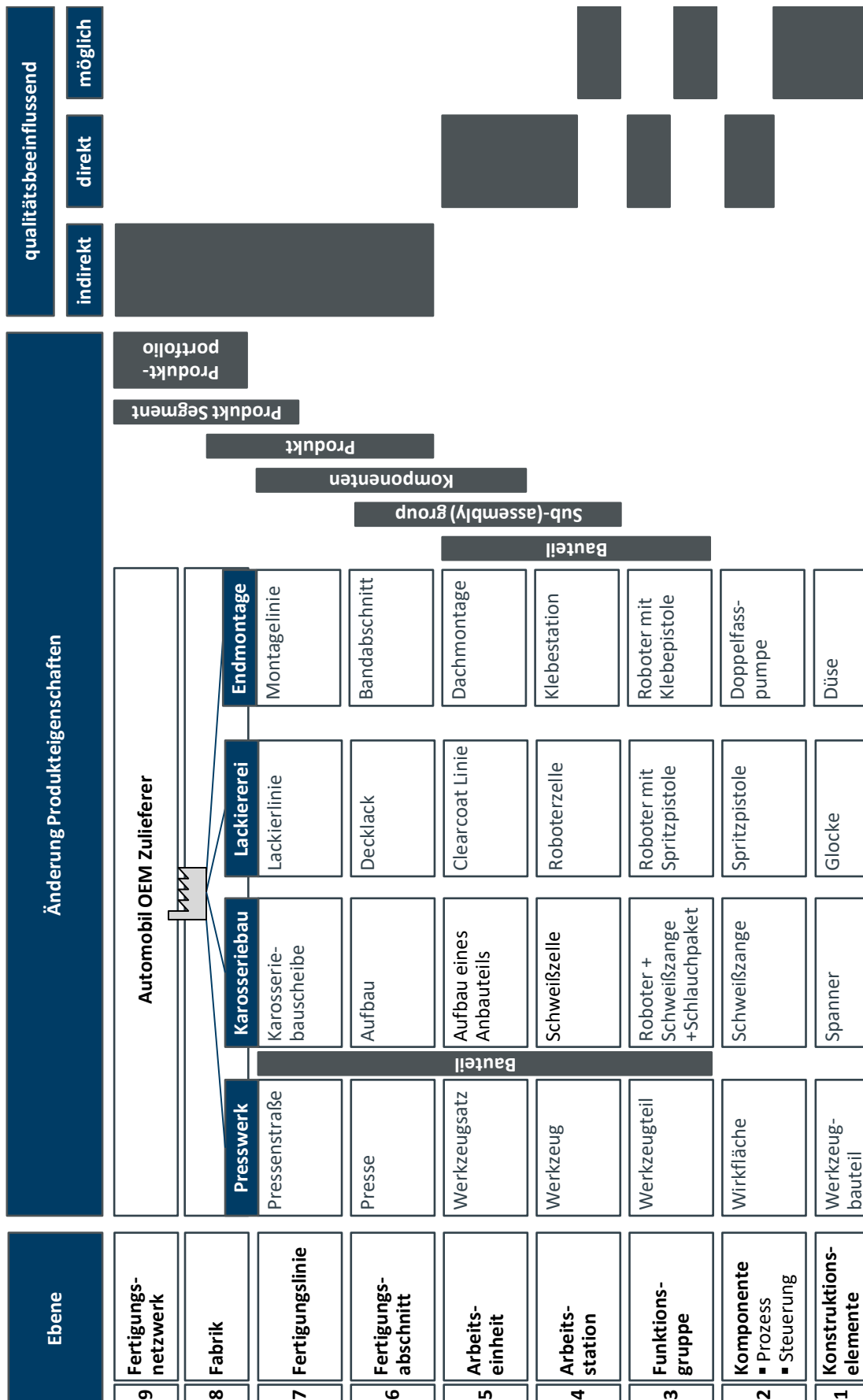


Abbildung 33: Verknüpfung der Ressourcenstruktur eines Produktionssystems mit Produkt- und Prozessqualität (Lüder et al. 2017b, S. 122)

Prozesskomponenten, die der Ausführung eines Fertigungsverfahrens nach (DIN 8580) (z.B. Kleben, Schweißen) dienen, sind wertschöpfend, während die verbleibenden zur Ausführung einer Einzelfunktion des Handhabens nach (VDI 2860) bzw. einer unterstützenden Funktion von Fertigungsverfahren und Handhabungsfunktionen nicht wertschöpfend sind. Charakteristisch für Prozesskomponenten ist ihr fest parametrierbarer Prozess. Für die Ausführung der Grundfunktionen beinhalten Komponenten I/O-Größen. Typische Steuerungsaufgaben der Komponenten sind Sensor-/Aktor-Daten, Ein- und Ausschalten sowie Diagnose- und Asset-Management.

Mithilfe der Funktionsgruppe ist es möglich, eine Fertigungs- (DIN 8580) oder Handhabungsfunktion (VDI 2860) und die dazu erforderliche unterstützende Funktion auszuführen. Resultierend lassen sich Funktionsgruppen in wertschöpfende und damit qualitätswirksame sowie nicht wertschöpfende Funktionsgruppen untergliedern. Nicht wertschöpfende Funktionsgruppen können unter Umständen jedoch auch qualitätswirksam für das Einzelteil sein, beispielsweise die Positionierung eines Bauteils vor dem Klebprozess. Eine Funktionsgruppe kann bei vorliegender Multifunktionsfähigkeit mehrere wertschöpfende oder nicht wertschöpfende Funktionen umfassen. Exemplarisch kann ein Presswerkzeug sowohl umformen als auch trennen oder ein Hubtisch-Rollenförderer sowohl drehen als auch verschieben. Ausgehend von der abgeschlossenen Funktion fokussieren wertschöpfende Funktionsgruppen auf die Fertigung von Einzelteilen. Als typische Vertreter für Funktionsgruppen sind Roboter mit Klebe- bzw. Schweißapplikationen zu nennen. Aus Steuerungssicht sind diese jeweiligen Prozesse zu koordinieren sowie zu überwachen. Die Prozessparameter, wie das Anfahren eines Roboters von Zielkoordinaten, einer einzelnen Funktionsgruppe müssen gesteuert werden. Weitere Steuerungsaufgaben von Funktionsgruppen sind beispielsweise die Fahrzeugidentifikation. Als exemplarische Steuerungsgrößen sind die Fahrzeugidentifikations-Nr. oder auch der Schweißstrom in Ampere zu nennen.

Eine Arbeitsstation stellt die notwendigen Teilfunktionen zur Erzeugung einer Mengeneinheit bereit. Eine Arbeitsstation kann unter Umständen keine wertschöpfenden Umfänge enthalten. Beispielhaft sei an dieser Stelle auf kombinierte Handhabungsfunktionen, wie sie bei den automatisierten Teilebereitstellungen mit einem Portalgreifer sowie einem Behälterbahnhof auftreten, verwiesen. Hinausgehend über die Funktionsgruppe ist es möglich, Fertigungs- und Handhabungsfunktionen zu kombinieren. Bezogen auf den Kleberauftrag auf eine Scheibe beinhaltet dies neben der Handhabung der Klebeapplikation mit dem Roboter auch die Fixierung des Bauteils mithilfe eines

Zentriertes. Die Produkteigenschaften können hierbei sowohl für das Einzelteil als auch für eine Unterbaugruppe erzeugt werden. Der Prozess erfordert eine Koordination sowie Überwachung. Für die Realisierung der Fertigungsprozesse müssen die Prozessparameter mehrerer Funktionsgruppen, z.B. Spanner geschlossen und Schweißzange aktiv, simultan gesteuert werden. Darüber hinaus zählen auch die Qualitätsprüfung und -datenerfassung (z.B. Schrauben) oder die Prozessdatenerfassung, zu typischen Steuerungsaufgaben dieser Ebene. Typische Steuerungsgrößen sind Informationen wie Drehmoment, Winkel und Zeit bei der Schraubdatenerfassung oder auch die Parametervorgabe mit Schweißstrom oder Anpressdruck.

Eine Arbeitseinheit enthält mehrere sich bedingende wertschöpfende Funktionen, die zur Erzeugung einer Mengeneinheit des Gesamterzeugnisses erforderlich sind. Die Funktionen wiederholen sich bei der Herstellung eines Arbeitsauftrages "m" Mal (REFA 1993). Ziel der Arbeitseinheit ist es, eine geschlossene Produkteigenschaft zu erzeugen. Die Abfolge dieser Prozesse wird durch das Produkt vorgegeben und kann nur sinnvoll in einer räumlich zusammenhängenden bzw. abgeschlossenen Einheit, wie dem Verbau eines Schiebedaches oder auch dem Schweißen einer Tür, erbracht werden. Die Arbeitseinheit ist die größte Einheit, in der Produkteigenschaften von Einzelteilen erzeugt werden. Es ist jedoch auch, wie in der Arbeitsstation, möglich, Baugruppen- oder Komponenteneigenschaften zu beeinflussen. Der Funktionsumfang einer Anlage enthält wertschöpfende Tätigkeiten und umfasst mehrere Fertigungsverfahren bzw. ein Fertigungsverfahren inklusive Handhabungsfunktion. Steuerungsaufgaben von Arbeitseinheiten können beispielsweise physische Resequenzierung, Anlagenführung und -bedienung, Betriebsdatenerfassung, Online-Messung oder auch Produktparameter sein, woraus sich Steuerungsgrößen, wie die Abweichung von Ist-/ Soll-Position, die Perlenkettengüte oder auch die technische Einzel-Verfügbarkeit ergeben.

Ein Fertigungsabschnitt enthält einen definierten homogenen (artähnlichen) Funktionsumfang mit Wertschöpfung für eine Baugruppe oder Komponente. Aus Sicht der Planung stellt der Fertigungsabschnitt eine zusammenhängende Struktur mit der Fertigung definierter Baugruppen dar, wie beispielsweise die Fahrwerkvormontage. Die Fertigungstiefe definiert den Umfang eines Fertigungsabschnitts. Die Produktqualität wird auf Ebene des Fertigungsabschnitts nicht direkt beeinflusst, jedoch sind indirekte Beeinflussungen, wie beispielsweise durch den Vorranggraph, möglich. Die Arbeitseinheiten innerhalb eines Fertigungsabschnitts müssen bei der Fertigung jedoch operativ gesteuert sowie überwacht werden. Gleiches gilt für den Materialfluss, der durch die Fertigung verursacht wird.

In diesem Zusammenhang ist exemplarisch die Kommissionierung von Sequenz- und Warenkorbumfängen zu nennen. Aus dem Materialfluss ergibt sich wiederum die Notwendigkeit der operativen Materialbestandsführung, u.a. interne Lager-, Wareneingänge und Umlaufbestände. Steuerungsgrößen für einen Fertigungsabschnitt sind beispielsweise Fügefolgen für den Karosseriebau oder die Montage. Ferner werden für das Controlling der Taktzeit Prozesszeiten, Nebenprozesszeiten sowie Bewegungszeiten ermittelt. Im Rahmen des Condition Monitorings werden auch Prozessabweichungen über Sensoren erfasst und ggf. Maßnahmen eingeleitet.

In einer Fertigungslinie sind alle zur Leistungserstellung erforderlichen Funktionen und Tätigkeiten zusammengefasst, um autonom und selbstständig zu agieren. Fertigungslinien sind somit eigenständig in der Lage als abgeschlossener Leistungsbereich zu handeln (Laucht 1995). Eine Fertigungslinie ist somit ein abgeschlossener homogener / artähnlicher Funktionsumfang, um eine Komponente, ein Produkt bzw. ein Produktsegment herzustellen, wobei die Ausprägung von der räumlichen Organisation abhängt. Folgende Funktionsumfänge ergeben sich exemplarisch für die Gewerke der Automobilindustrie:

- **Presswerk:** Umformen, Trennen und Stoffeigenschaften ändern,
- **Karosseriebau:** Fügen und Stoffeigenschaften ändern,
- **Lackiererei:** Beschichten und Stoffeigenschaften ändern und
- **Montage:** Fügen.

Der Funktionsumfang zwischen Fabrik und Fertigungsnetzwerk ist unternehmensspezifisch. Deshalb subsumieren beide Begriffe je nach spezifischer Ausprägung den gesamten Funktionsumfang, der zur Herstellung eines Erzeugnisses mit einem, wenigen oder auch vielen Einzelteilen erforderlich ist (REFA 1993). Es erfolgt somit die Fertigung des Produkts, des Produktsegmentes oder gar des gesamten Produktportfolios eines Unternehmens. Aus Steuerungssicht ist eine Differenzierung dennoch möglich. Auf Fabrik-Ebene finden taktisch-planerische Aufgaben zur Sicherstellung der Teilverfügbarkeit mit kurzfristigem Planungshorizont von Wochen bis Monaten statt. Ebenso gilt es, operativ-vorbereitende Aufgaben zur Realisierung der Produktion im Rahmen von Stunden bis Tagen, wie beispielsweise Wochen- und Tagesprogrammplanung, Feinplanung Materialbeschaffung zu realisieren. Wie auf den unteren Ebenen sind auch operativ-überwachende Aufgaben zur Sicherstellung der Produktionseffektivität und -effizienz vertreten, z.B. virtuelle Resequenzierung sowie Monitoring und Analyse. Hierunter fallen u.a.

Steuerungsaufgaben, wie Netto-Sekundärbedarfsermittlung, Vorschau Lieferabruf, Wochen- und Tagesprogramm-bildung (Perlenkette), Feinplanung Materialbeschaffung, Frachtkostenoptimierung mit entsprechenden Steuergrößen wie Produktmix, Vertriebsrestriktionen, Baubarkeit oder auch Kapitalbindungskosten und Durchlaufzeit.

Im Fertigungsnetzwerk finden sich strategische Aufgaben zur Vertriebsplanung mit langfristigem Planungshorizont (bis 10 Jahre) wieder. Ebenso gibt es auch taktische Aufgaben zum Abgleich von Kapazitäten und Bedarf mit mittelfristigem Planungshorizont (bis 3 Jahre) sowie operative Querschnittsaufgaben mit Relevanz für das gesamte Unternehmen wie beispielsweise Auftrags- und Produktdatenmanagement sowie Baubarkeitsprüfungen. Heterogen wie der Zeithorizont der Aufgaben sind auch die Steuerungsaufgaben mit beispielsweise langfristiger Absatz-, Produktionsprogrammplanung und Werkbelegung, aber auch Auftragsmanagement. Dies spiegelt sich auch in den Steuergrößen wider, welche auf oberster Fertigungsebene exemplarisch Wirtschaftlichkeitsrechnung, Investitions- und Kapazitätsplanung, Fabrikkosten oder auch Liefertreue umfassen.

6.2 Informationen für die Risikobeurteilung

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen bzgl. der Anlagenstruktur ist eine wirkbezogene Verknüpfung der Ebenen mit den Informationen bzgl. des Risikos hinsichtlich Produkt, Prozess sowie Projekt (vgl. Kap. 3.2) möglich. Die Risiken hinsichtlich Produkt und Prozess der Elemente leiten sich aus deren Funktionalitäten ab. Folglich beinhalten die Elemente der Ebenen die Ausprägung eines Prozess- sowie Produktmerkmals entsprechend ihrer wertschöpfenden Funktion in Bezug auf das Endprodukt. In diesem Zusammenhang wird der direkte Wirkbezug zum Prozess sowie Produkt hergestellt. Eine wirkbezogene Verknüpfung bzgl. Endprodukt sowie Gesamtprozess ist nicht gegeben, da sich diese fallspezifisch unterscheiden. Abbildung 34 visualisiert den Zusammenhang am Beispiel der Funktionsgruppe „Klebeapplikation“. Die fehlerhafte Dimensionierung der Klebedüse führt zu einer ungenügenden Kleberaupe. Während im direkten Bezug auf das Produkt eine allgemein negative Beeinflussung hinsichtlich der Gasdichtigkeit verknüpft werden kann, ist eine weitere wirkbezogene Ableitung nicht möglich. Tritt dieser Fehler beispielsweise beim Scheibeneinbau auf, ergeben sich andere Wirkungen als bei der Montage von Verkleidungsteilen. Im ersten Fall kommt es zur Beanstandung durch Wassereintritt, während es im zweiten Fall lediglich zu optischen Beeinträchtigungen kommt. Gleiches gilt für den Prozess. Aus dem fehlerhaften Kleberauftrag ergeben sich Störungen. Eine Ableitung bzgl. der Ausprägung dieser Störung, in Form einer wirkbezogenen

Verknüpfung, ist jedoch nicht möglich, da diese sowohl vom umliegenden Prozessaufbau sowie Prozessablauf, z.B. Notstrategien, Taktzeit, etc., abhängt. Eine allgemeine Verknüpfung der Fehlerursachen mit der Wirkung auf Projekte ist bedingt durch die individuellen Projektspezifika nicht gegeben. Zusammenfassend ergibt sich der in Abbildung 33 und Abbildung 34 dargestellte Bezug zwischen der Produkt- bzw. Prozessqualität und den Industrie 4.0-Ebenen (Röpke et al. 2016). Den Produktionsressourcen sind entsprechend der jeweiligen Ebene allgemeine Fehlerfolgen zuzuweisen. Die spezifischen Fehlerfolgen sind entsprechend der Einbettung in die höheren Systemebenen für das Produkt, den Prozess sowie das Projekt vorzunehmen.

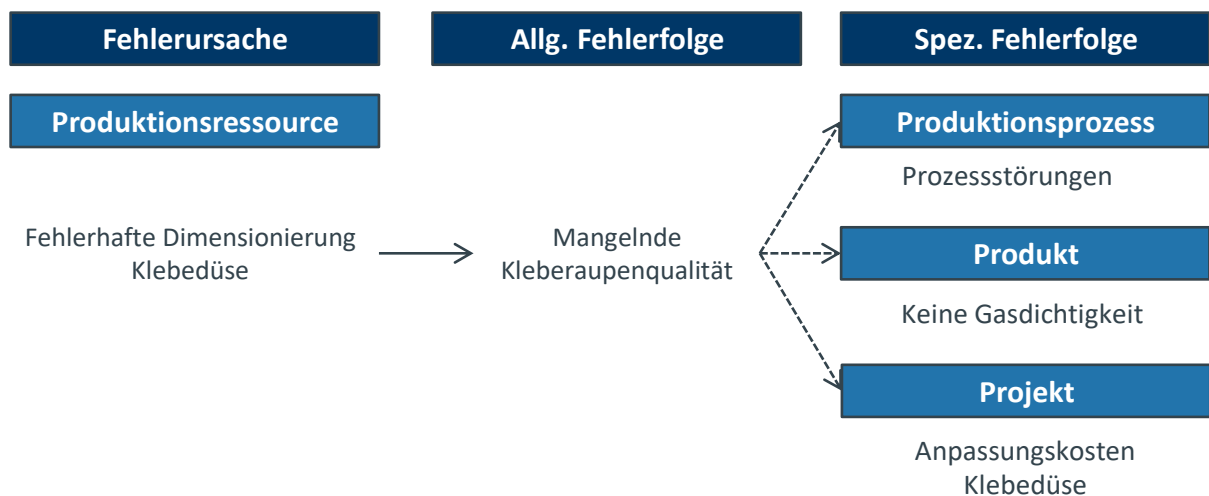


Abbildung 34: Verknüpfung der Produkt-, Prozess- sowie Projektrisiken am Beispiel einer Klebedüse

7 Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen

Mit der Ableitung einer einheitlichen Struktur in Kapitel 6 sind die Voraussetzungen für die Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering geschaffen. Aufbauend auf dieser Grundlage erfolgt in diesem Kapitel mit der Erarbeitung der Methode zur Risikoidentifizierung die Beantwortung der nächsten Schale innerhalb des Modells (vgl. Abbildung 35).

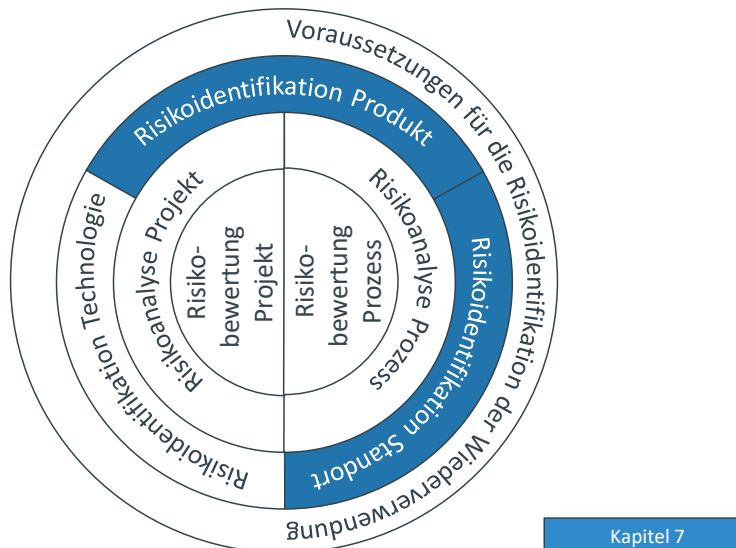


Abbildung 35: Einordnung des Kapitels 7 in den Forschungskontext

Dieses Kapitel untergliedert sich in drei Unterkapitel. Eingangs gilt es die allgemeine Methodik zur Reduzierung des Aufwands für die Risikoidentifizierung zur Beantwortung der Forschungsfrage vorzustellen:

Wie kann der Aufwand für die Risikoidentifizierung bzgl. des Fertigungsprozesses bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering reduziert werden?

Basierend auf dieser allgemeinen Methode wird die Risikoidentifizierung für das zu fertigende Produkt und den neuen Anlagenstandort beschrieben. Die vorgestellten Methoden dienen als Basis für die anschließende Risikoanalyse in Kapitel 8. In diesem Zusammenhang werden die verbleibenden beiden Forschungsfragen bzgl. Risikoidentifizierung beantwortet.

Wie können die Risiken durch neue Produkte bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert werden?

Wie können die Risiken durch neue Standorte bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert werden?

7.1 Methodik Delta-Engineering

Die Methodenkonzipierung für die Risikoidentifikation bedingt im ersten Schritt eine Analyse des Informationsflusses bei der Wiederverwendung im Anlagenengineering (vgl. Kap. 2). Für die Risikoidentifikation stehen Sekundär- wie auch Primärerhebungsmethoden zur Auswahl (vgl. 4.2). Hierbei können die Erkenntnisse aus folgenden Phasen während der Entstehungsphase genutzt werden (vgl. Abbildung 15):

- der Entstehungsphase selbst,
- der Entstehungsphase anderer Projekte,
- der Nutzungsphase anderer Projekte und
- der Entsorgung anderer Projekte.

Diese Erkenntnisse können im Rahmen des Lessons Learned-Prozesses mittels Dokumentenanalyse bzw. im Rahmen von Interviews aufgenommen werden. Im Sinne der Systemtheorie (vgl. Kap. 2.1) reagiert ein System in Abhängigkeit der Systemelemente. In diesem Zusammenhang gilt es, die Differenzen der relevanten Einflussgrößen bzgl. erprobter und neuer Parameter innerhalb des Produktlebenszyklus aufzunehmen. Resultierend wird der Abdeckungsgrad der Ressource (vgl. Kap. 2.5.3) nicht isoliert betrachtet, sondern auch die Verknüpfungen im PPR-Modell für die Elemente Produkt sowie Umgebung werden berücksichtigt (vgl. Kap. 7.2 und 7.3). Im Folgenden werden die Grundlagen für die Anwendung dieser Methodik beschrieben (vgl. Abbildung 36).

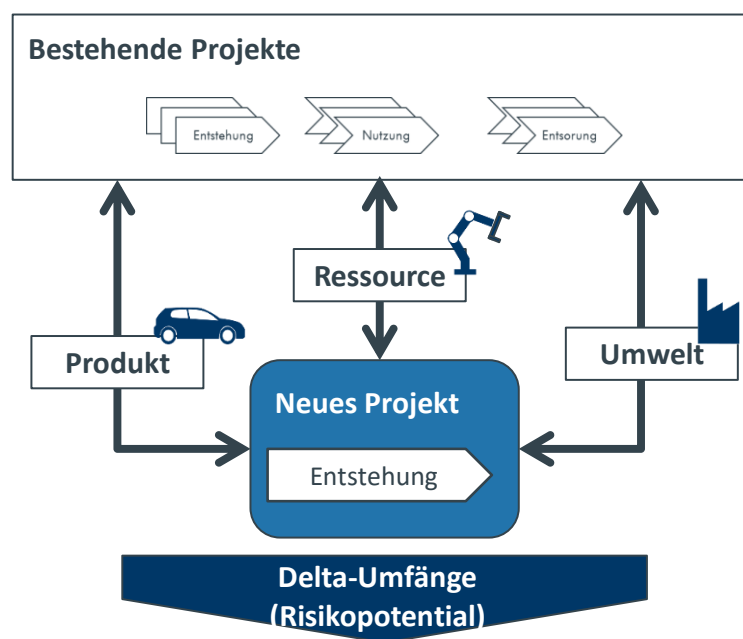


Abbildung 36: Deltaengineering

Resultierend aus dem PPR-Modell (vgl. Kap. 2.1.1) sind neben der Risikoidentifikation durch Produkt- bzw. Standort-Abweichungen auch Anlagenschnittstellen mit häufigen

Modifikationen zu detektieren. Neben den Anpassungen am Produkt und den Umgebungsbedingungen besteht auch die Möglichkeit, das Ressourcen-Entwurfselement für eine bessere Wiederverwendbarkeit zu modifizieren. Resultierend ergeben sich höhere Reifegrade der Entwurfselemente und bessere Anlaufprozesse. In diesem Zusammenhang sind folgende Ziele der Delta-Betrachtung zu nennen:

- Minimierung des Erhebungsaufwands,
- Skalierbarkeit der Betrachtung durch modularen Aufbau,
- Erhebung Ist-Zustand für LH-Erstellung,
- Identifizierung Soll-Ist-Abweichungen für Risikoanalyse und -bewertung sowie
- Identifizierung Stellhebel bzgl. besserer Wiederverwendbarkeit von Entwurfselementen.

7.1.1 Informationsmodellierung Delta-Engineering

Die Wiederverwendung von Informationen für die Risikoidentifizierung bedingt eine wiederverwendungsgerechte Modellierung der Daten. Die systematische Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering basiert i.d.R. auf standardisierten Bausteinen (vgl. Kap. 2.4). Der Anwendungsfall gibt die Spezifizierung sowie Kombination dieser standardisierten Bausteine vor. In diesem Kontext entstehen aus den Bausteinen Anlagen bzw. Prozesse. Gleiches gilt für die Modellierung der Informationen bei der Risikoidentifizierung (vgl. Abbildung 37).

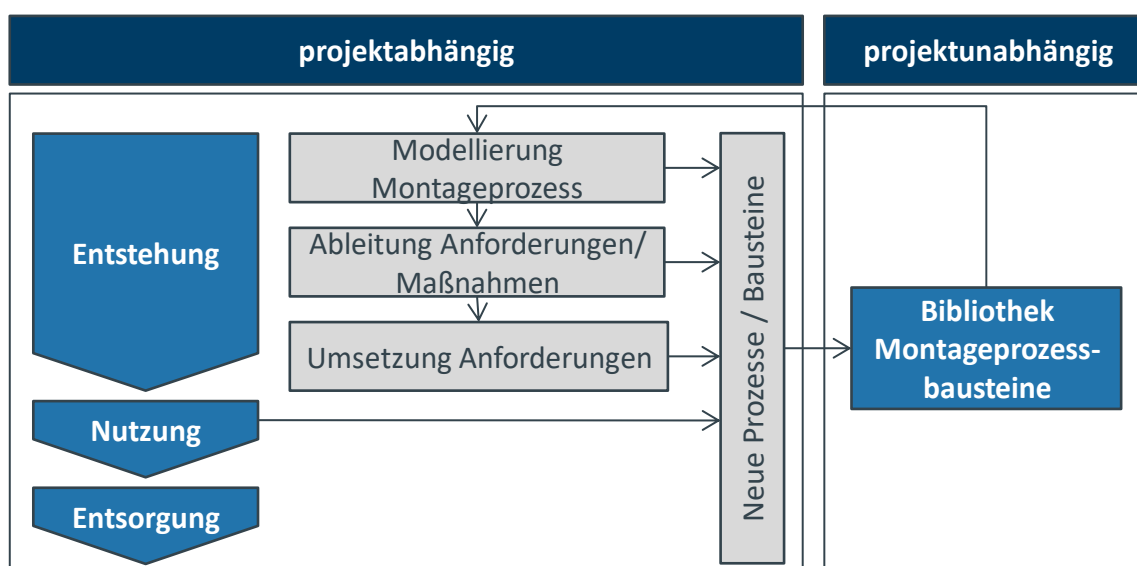


Abbildung 37: Informationsmodellierung Delta-Engineering

Während die Fehlerfolgen der modifizierten Entwurfselemente somit produkt- sowie standortabhängig sind, sind die potentiellen Ursachen der Entwurfselemente produkt- sowie standortneutral (vgl. Kap. 6.2). Resultierend können die Fehlerursachen jedes

Elements standort- sowie produktunabhängig definiert werden. Basis der Risikoidentifizierung ist in diesem Zusammenhang eine Bibliothek aus Montageprozessbausteinen mit den relevanten Informationen, aus denen sich das zu untersuchende System zusammensetzt. Die Summe der Einflüsse bildet die Gesamtheit der zu untersuchenden Fehlereinflüsse (Kutzbora 2015).

Die Bibliothekselemente lassen sich entsprechend ihrer Funktion sowie der Art des Arbeitsablaufs klassifizieren. Die Granularität der Klassifizierung wird durch den Anwendungsfall definiert. Es ist zwischen der hohen Wiederverwendbarkeit kleinster Einheiten gegenüber dem Nutzen komplexer Subsysteme abzuwägen (Weyrich und Klein 2012).

Für die Klassifizierung der Arbeitsabläufe kann der Mechanisierungsgrad des Arbeitssystems herangezogen werden. Im Folgenden wird zwischen manuellen, hybriden sowie automatisierten Montagesystemen unterschieden (Lotter 2012). In Bezug auf die hybride Montage können die Arbeitsbereiche zwischen Ressource und Mitarbeiter differenziert werden (DIN EN ISO 10218-1). Der Prozess des Montierens subsumiert die Montagefunktionen (DIN 8593-0) (VDI 2860):

- Fügen,
- Handhaben,
- Kontrollieren,
- Justieren und
- Sonderoperationen.

Die Montagefunktionen untergliedern sich wiederum in Funktionsumfänge, wie z.B. Schrauben für die Funktion Fügen.

Montagefunktion	Funktionsumfang	Mechanisierungsgrad		
		manuell	hybrid	automatisch
Fügen	Schrauben	man. Schrauben	hybrides Schrauben	automatisches Schrauben
	Kleben	man. Kleben	hybrides Kleben	automatisches Kleben
Handhaben
...

Abbildung 38: Bibliotheksstruktur Montageprozessbausteine

Aus der Zusammensetzung des Mechanisierungsgrads und der Montagefunktion mit dem dazugehörigen Funktionsumfang bildet sich eine Matrix (vgl. Abbildung 38). In Abbildung 39 ist der Aufbau eines Montagebausteins exemplarisch dargestellt.

Die Bezeichnung der Bausteine orientiert sich am Mechanisierungsgrad, dem Funktionsumfang und ggf. einer Ordnungsnummer für eine feinere Differenzierung. Die Struktur der Bausteinelemente entspricht der FMEA und umfasst folgende Elemente:

- Funktion sowie Fehlerfunktion,
- Fehler und Fehlerursache sowie
- Funktions- und Fehlerverknüpfung.

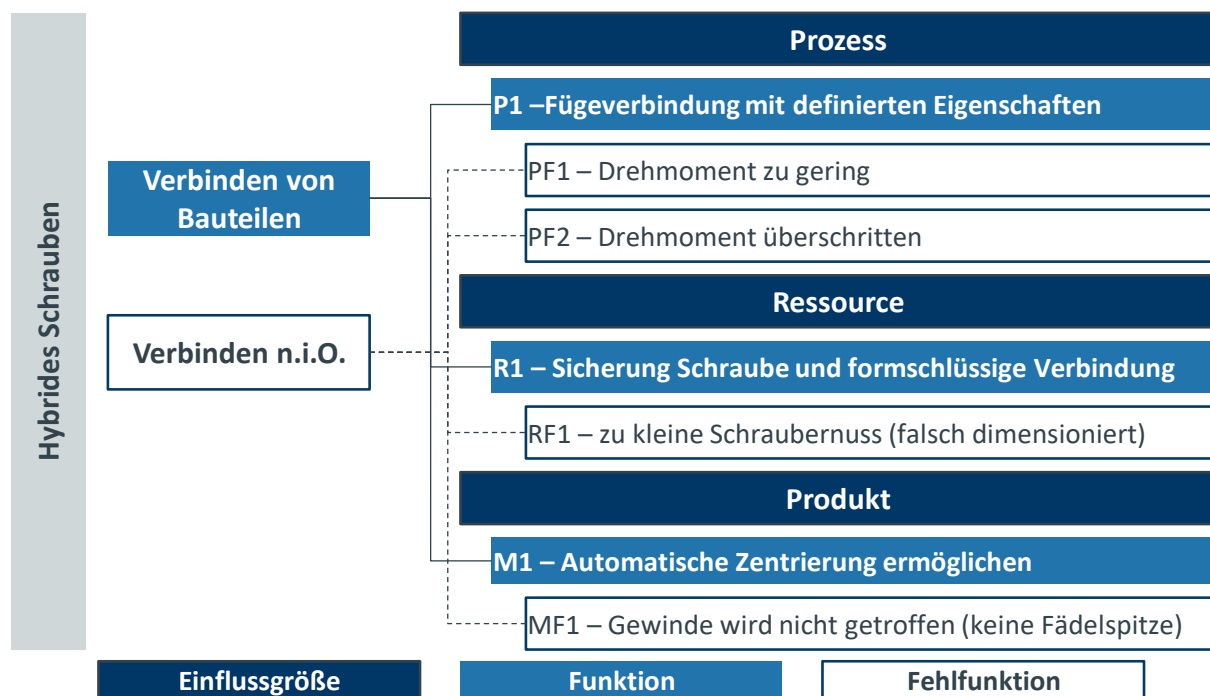


Abbildung 39: Struktur Montageprozessbaustein

Eingangs werden in Analogie zur FMEA (vgl. Kap. 5.1.5) allen Funktionen Fehlerfunktionen zugewiesen. Anschließend gilt es die relevanten Einflussgrößen zu erfassen. Dieser Prozess kann durch die Visualisierung der Einflussgrößen in einem Ishikawa-Diagramm unterstützt werden. Abschließend sind die Funktionen sowie Fehlerfunktionen mit den Einflussgrößen zu verknüpfen (Kutzbora 2015).

7.1.2 Bibliothekgestützte Risikoidentifizierung

Für die Konzipierung einer Anlage sind die Hauptfunktionen der Anlage abzuleiten (vgl. Kap. 2.5). Die Realisierung der Funktionalitäten bedingt eine Erarbeitung technischer Lösungen. Die übergeordneten Funktionalitäten der Anlagen lassen sich entsprechend des Top-Down-Ansatzes in Teilfunktionen untergliedern. Die kleinsten sinnvoll untergliederbaren Einheiten bilden Montageprozessbausteine (vgl. Kap. 7.1.1). Basis für die Charakterisierung der Bausteine hinsichtlich ihrer Funktionalität bilden einerseits die Normen zum Fügen (DIN 8580) (DIN 8593-0) und dem Handhaben (VDI 2860), andererseits

auch die Erfahrung der Anwender bzgl. einzelner Montageprozessschritte. Weiterhin beinhalten die Bausteine die Fehlerursachen. Diese können u.a. aus den Mängellisten vorheriger Projekte überführt werden. Im Rahmen der Risikoidentifizierung sind neben den bestehenden Erkenntnissen auch neue Fehlerursachen, z.B. durch Kreativitätstechniken in der Bibliothek der Bausteine, zu ergänzen (vgl. Kap. 4.2). Durch die projekt- sowie ressourcenübergreifende Anreicherung der Fehlermöglichkeiten ergibt sich eine präventive Fehleridentifikation für Folgeprojekte.

Anschließend erfolgt eine projektspezifische Zuordnung der Montageprozessbausteine zu den Einzel- und Teilprozessen. Hierbei werden die Fehlerursachen der Montageprozessbausteine den höheren Funktionalitätsebenen bzgl. Produkt und Prozess zugeordnet (vgl. Kap. 6.2). Abschließend erfolgt eine wirkbezogene Verknüpfung in Bezug auf die Hauptfunktionen der Ressource (vgl. Abbildung 40).

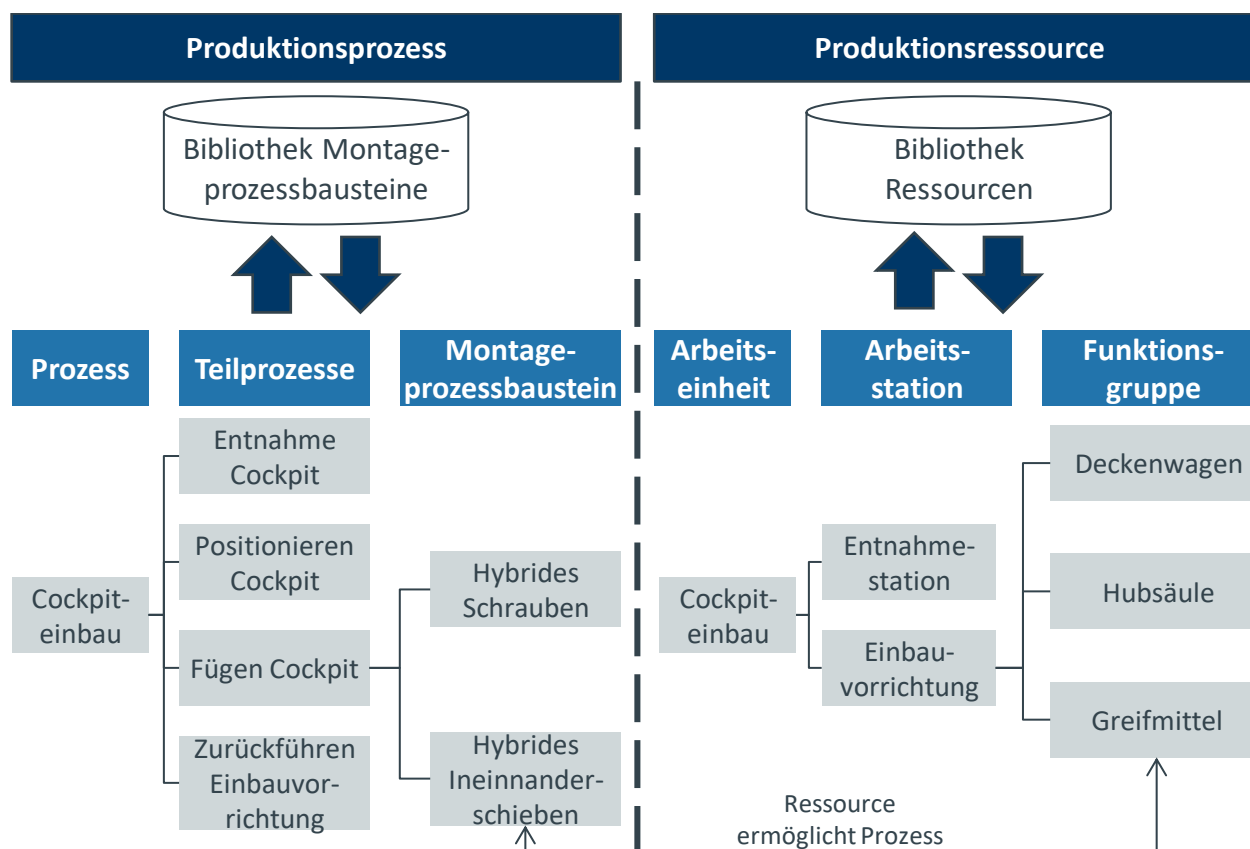


Abbildung 40: Modellierung des Cockpiteinbaus mit Montageprozessbausteinen

Aus der Gesamtheit der verknüpften Montageprozessbausteine (vgl. Abbildung 39) ergibt sich eine Ursachenliste für Risiken. Die identifizierten Ursachen sind fallspezifisch hinsichtlich ihrer Relevanz zu analysieren und zu bewerten sowie hinsichtlich ihrer Ursachenart (vgl. Kap. 7.1) in Umwelt, Produkt sowie Ressource zu differenzieren. Abschließend gilt es die relevanten Fehlerursachen in Anforderungen für die Anlage zu überführen und zu kommunizieren.

In Bezug auf den Cockpитеinbau ergibt sich beispielsweise folgende Fehlerart: „Mutter und Schraube sind nicht normgerecht miteinander verbunden“. Eine mögliche Fehlerursache des Montagebausteins ist: „Mitarbeiter lässt Schalter zu früh los“. Eine Klassifizierung der Ursache als relevant, ergibt die Anforderung: „frühzeitiges Loslassen des Schalters vermeiden“ (Kutzbora 2015). In den Kapiteln 7.2 und 7.3 erfolgt die Übertragung dieser Vorgehensweise in Bezug auf die Umwelt und das zu fertigende Produkt.

7.2 Delta-Engineering-Umwelt

Auf Basis der allgemeinen Methodik bzgl. Risikoidentifizierung (vgl. Kap. 7.1) erfolgt nun eine Darstellung des Delta-Workshops-Umwelt. Auf Basis der identifizierten Informationsquellen wird die Ablauf- und Aufbauorganisation der Methode vorgestellt. Abschließend erfolgt die Konzipierung der Werkzeuge zur Realisierung der Methode.

7.2.1 Ablauf- und Aufbauorganisation Delta-Engineering-Umwelt

Für die Risikoidentifizierung bzgl. eines neuen Anlagenstandorts stehen verschiedene Informationsquellen zur Verfügung (vgl. Abbildung 15). Neben den Ist-/Soll-Abweichungen aus den Bibliotheksbausteinen im Sinne des Delta-Engineerings gilt es, die Erfahrungen aus den vorherigen Lebensphasen möglichst ganzheitlich für ein neues Anlagenprojekt zu überführen. Folglich untergliedert sich der Prozess in eine Erfahrungs- (Lessons Learned) und eine Delta-Erfassung (Seifert 2016).

Als Eingangsgröße für die Risikoidentifizierung wird eine Lessons Learned-Betrachtung vorgesehen. Zu diesem Zweck erfolgt in Vorbereitung eine Sekundärerhebung in Form einer Dokumentenanalyse hinsichtlich der Mängel über den Produktlebenszyklus der Anlage, beispielsweise durch die Instandhaltungen des zukünftigen Standorts oder auch bisheriger Anlagennutzer. Idealerweise sind diese Informationen bereits den Montageprozessbausteinen in der Bibliothek zugeordnet und die Anlagen bereits entsprechend modifiziert. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Konzipierung der Erhebungsmethodik der Ist-/Soll- Abweichungen, daher wird von einer detaillierten Darstellung bzgl. Lessons Learned abgesehen (Kamiske 2015).

Für eine Vergleichbarkeit der Abfragen bzgl. Ist-/Soll-Abweichungen erfolgt die Erfassung der Abweichungen auf Basis von Experteninterviews. Diese sind teilstandardisiert, da so eine Interaktion zwischen den Interviewpartnern, beispielsweise zur Diskussion komplizierter Zusammenhänge, möglich ist. Das Fragenraster aus den Montageprozessbausteinen (vgl. Kap. 7.1), welches alle relevanten Einflüsse abfragt,

dient als Leitfaden für die Interviews. Dieses wird im Folgenden als Fragenkatalog bezeichnet. Eine Detaillierung des Fragenkatalogs findet sich in Kapitel 7.2.2.

Zusammenfassend sind sowohl der Prozess des Lessons Learned als auch die Delta-Erfassung vorzubereiten (vgl. Abbildung 41), anschließend durchzuführen sowie im Rahmen der Risikoanalyse (vgl. Kap. 8) nachzubereiten und die Erkenntnisse zu kommunizieren.

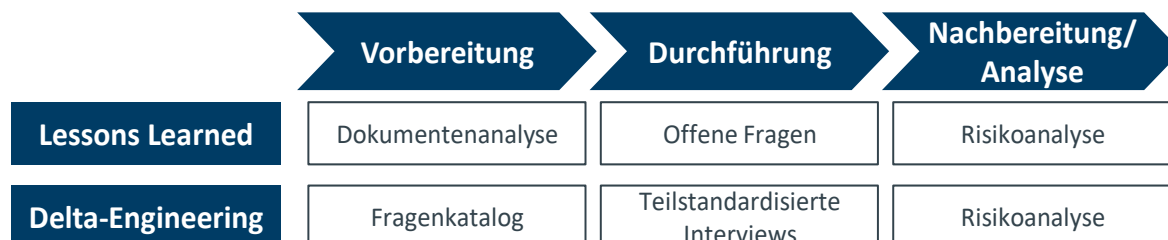


Abbildung 41: Exemplarischer Ablauf Delta-Engineering-Umwelt-Workshop

Ist die Datenaktualität bzgl. der zukünftigen Umweltumgebung der Anlage nicht garantiert, ist es zielführend, für die Erfassung des Ist-Zustands die Datenerhebung mit den Ansprechpartnern der potentiellen neuen Anlagenumgebung durchzuführen. Der Abgleich erfolgt domänenspezifisch (vgl. Kap. 7.2.2) mit den verantwortlichen Fachexperten für z.B. die Fördertechnik oder auch die Materialbereitstellung. Die Abfrage sollte jedoch nicht fachspezifisch isoliert, sondern in einem interdisziplinären Team erfolgen. Dieses Vorgehen ist auch im Rahmen eines Lessons Learned-Workshops sinnvoll.

Ein schlanker Abgleich der Anforderungen bedingt eine sinnvolle anlagenübergreifende Bündelung der Schnittmenge der Abfragen. In Abhängigkeit der zu untersuchenden Ebene (vgl. Kap. 6) variieren die zu untersuchenden Umfänge. Dies wird beispielsweise bei Betrachtung der Integration einer Anlage oder Funktionsgruppe deutlich. Während für Schwerpunkte wie die Hallenstruktur, z.B. die Luftfeuchtigkeit, für alle Anlagen bzw. Funktionsgruppen relevant sind, betreffen andere, wie z.B. die Fördertechnik, lediglich einen Bandabschnitt bzw. eine einzelne Anlage. Die Untergliederung der Themen wird durch die Clusterung des Fragenkatalogs determiniert. Für eine Funktionsgruppe sind hingegen primär die anlageninternen Schnittstellen entscheidend.

Aus fachlicher Sicht sind für den Abgleich Anlagen-Verantwortliche sowie domänenspezifische Querschnittsverantwortliche notwendig. Dies gilt sowohl für die Erfassung des Ist- als auch Soll-Stands. Die personelle Zusammensetzung variiert in Abhängigkeit der Organisationsstruktur des Unternehmens. Aus Projektsicht kann es zielführend sein, wenn der Abgleich durch einen Projektleiter bzw. Moderator unterstützt wird, welcher den

geregelten Ablauf der Methodik sicherstellt. Abbildung 42 visualisiert exemplarisch das Team für die Delta-Betrachtung.

Querschnitt	Produktionsressource/Arbeitseinheit		
	Frontend	Cockpit	...
Bau	Hallenraster	Hallenraster
Fördertechnik	EHB	SKID
...

Abbildung 42: Exemplarischer Aufbauorganisation Delta-Engineering-Umwelt

7.2.2 Konzipierung Fragenkatalog

Aus der Ablauf- und Aufbaustruktur des Delta-Workshop-Standorts ergeben sich verschiedene Anforderungen an den Fragenkatalog, der die Einflüsse auf die wiederzuverwendenden Anlagenumfänge möglichst vollständig erfassen soll. Für eine Reduzierung des Aufwands sind domänenspezifische Einflüsse möglichst anlagenübergreifend zu erfassen. Basis für die domänenübergreifende Abfrage bildet im ersten Schritt die Identifizierung der relevanten Schnittstellen. Diesen werden anschließend die identifizierten Einflüsse entsprechend der Montageprozessbausteine (vgl. Kap. 7.1) zugewiesen. Abschließend werden die identifizierten Einflüsse domänenspezifisch mit den Ressourcen verknüpft (vgl. Abbildung 43).

Die Identifikation der Domänen von Anlagenelementen setzt eine Betrachtung der Schnittstellen voraus. In diesem Zusammenhang bietet sich eine Strukturierung der Elemente entsprechend der VDI2206 an (vgl. Kap. 2.1.2). Die betrachteten Einflussgrößen variieren in Abhängigkeit von der Funktionalität des betrachteten Elementes und folglich entsprechend der hierarchischen Ebene innerhalb der Produktion (vgl. Kap. 6). Jedes der Elemente steht hierbei in Relation mit anderen Elementen. Eine modulare Abfrage ist im Sinne einer funktionsorientierten Strukturierung der Elemente gegeben.

Die Herleitung der relevanten Schnittstellen erfolgt exemplarisch auf Ebene der Arbeitseinheit (vgl. Kap. 6.1) analog einer mechatronischen Einheit (vgl. Abbildung 4). Eingangs stellt die Umgebung der Anlage den Rahmen der Betrachtung dar. Hierbei ergibt sich der Bedarf des Abgleichs bzgl. der mechanischen Einbettung in die nächste Ebene, z.B. Hallenstruktur, sowie den gegebenen Umgebungsbedingungen, z.B. Temperatur oder Luftfeuchtigkeit. Weiterhin sind auch die gesetzlichen Rahmenbedingungen am Standort zu berücksichtigen. Anlagen im Sinne von Produktionsressourcen sind durch einen Informations-, Energie- sowie Stofffluss zu charakterisieren. Für den Informationsfluss sind die Anbindung an die Shopfloor-IT sowie die Kommunikation mit dem Menschen und für

den Energiefluss die Medienversorgung zu untersuchen. Hingegen setzt die Untersuchung des Stoffflusses eine Betrachtung der Bauteillogistik sowie der Fördertechnik des Bauteils voraus.



Abbildung 43: Ablauf Konzipierung Fragenkatalog

Die Elemente innerhalb des Systems, wie z.B. die Funktionsgruppen, haben gleichermaßen externe Schnittstellen im Sinne mechatronischer Einheiten, die fallspezifisch zu konkretisieren sind. Die zu untersuchenden Einflüsse ergeben sich aus den Montageprozessbausteinen der Bibliothek (vgl. Kap. 7.1). Die Ableitung der Ursachen erfolgt deduktiv auf Basis eines Fehlerbaums. Eine Ergänzung ist auch mithilfe induktiver Verfahren, wie z.B. dem Ereignisbaum, möglich (vgl. Kap. 4.2). Die Ableitung auf Basis der Montageprozessbausteine ist am Beispiel eines Sauggreifers in Abbildung 44 dargestellt.

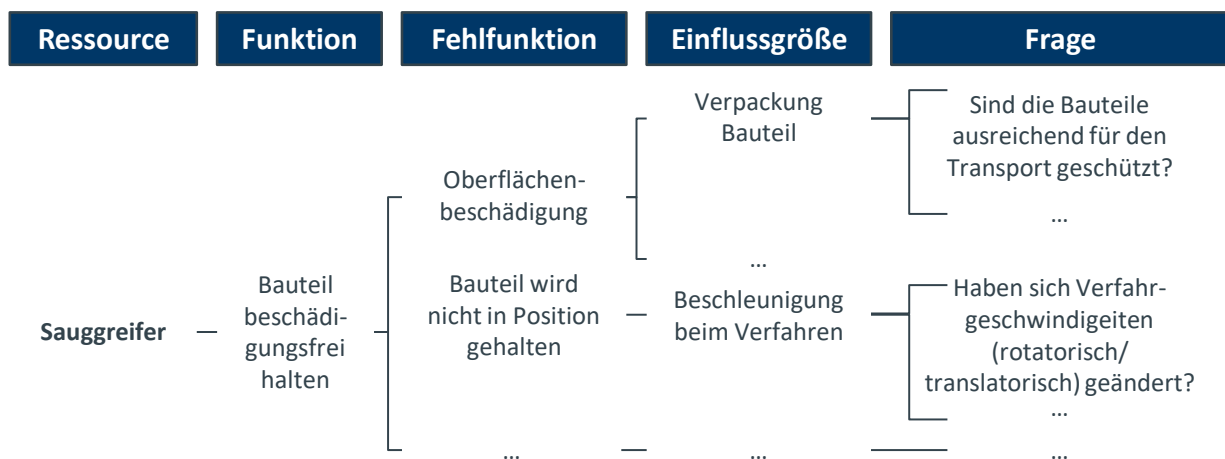


Abbildung 44: Herleitung Fragenkatalog am Beispiel eines Sauggreifers

Die systematische Modellierung des Systems analog der FMEA ermöglicht ein besseres Systemverständnis, um die Einflüsse möglichst erschöpfend abzubilden. Die Gesamtheit der Einflüsse bildet den Fragenkatalog. Für eine Verknüpfung der abzugleichenden Einflüsse mit den Fachexperten erfolgt anschließend eine domänenspezifische Untergliederung des Fragenkatalogs. Im nächsten Schritt gilt es, die Merkmale bzgl. eines Einflussobjektes zu Fragenmodulen zu clustern. Auf der allgemeinen Basis der Montageprozessbausteine sowie Domänen können die anlagenspezifischen Einflüsse hinsichtlich ihres Ist-/ Soll- Zustands abgebildet werden (vgl. Abbildung 45).

Domäne		Fragenmodul		Einfluss			Ist-/Soll Zustand					
							IST			SOLL		
				Leichtbau	Stahlbau	Sonstiges				Leichtbau	Stahlbau	Sonstiges
1.1 Hallenstruktur												
1.1.1 Hallenbauweise												
001	In welcher Bauweise ist die Halle ausgeführt?			<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Abbildung 45: Struktur Fragenkatalog

Die Fragenmodule sind anschließend anlagenübergreifend den Anlagenbestandteilen zuzuordnen, um eine gezielte Abfrage im Workshop zu realisieren. Mit dem Bezug der Fragenmodule zu den Anlagenelementen in einer übergeordneten Matrix ergeben sich anlagenspezifische sowie -übergreifende Fragenmodule.

		Produktionsressource			
		Behälterbahnhof	Manipulator	Greifmittel	...
1.1.Hallenstruktur	1.1.1 Hallenbauweise	ü	ü		
	1.1.2 Boden				
	1.1.3 Dach		s		
	...				

keine Relevanz
 ü übergreifend
 s spezifisch

Abbildung 46: Erstellung projektspezifischer Fragenkatalog

Abbildung 46 visualisiert exemplarisch die Erstellung des Fragenkatalogs aus den Bibliotheksbausteinen. Die Anlagenplaner erstellen durch die Auswahl der Montageprozessbausteine die zu untersuchenden Umfänge, welches beispielsweise die Ebenen Arbeitseinheit oder Funktionsgruppe sind. Aus der vordefinierten Verknüpfung der Fragenmodule mit den Anlagenelementen ergibt sich abschließend ein Fragenkatalog mit folgenden Clustern:

- übergreifende Fragenmodule je Ebene (beispielsweise Fördertechnik für alle Anlagen eines Bandabschnitts) und
- spezifische Fragenmodule je Element (beispielsweise Beleuchtung/ Lichtverhältnisse für eine optische Messstation).

Diese Cluster geben den Ablauf des Delta-Workshop-Umwelt vor.

7.3 Delta-Engineering-Produkt

Analog zum Delta-Engineering-Umwelt erfolgt eine Abhandlung bzgl. der Identifizierung von Abweichungen hinsichtlich des Produkts. Gleichmaßen werden für die Erläuterung der Methode eingangs Ablauf- und Aufbauorganisation und abschließend die Konzipierung des Werkzeugs zur Unterstützung vorgestellt.

7.3.1 Ablauf- und Aufbauorganisation Delta-Engineering-Produkt

Die Delta-Betrachtungen bzgl. Umwelt und Produkt decken sich methodisch, differenzieren sich jedoch hinsichtlich der zu untersuchenden Umfänge. In diesem Zusammenhang wird von einer Darstellung der Ablauforganisation abgesehen.

Das Konzept des Delta-Engineering-Produkt greift auf die Informationen vorangegangener Produktlebenszyklen sowohl im Sinne des Delta-Engineerings als auch des Lessons Learned zurück (vgl. Kap. 7.2).

Bedingt durch den Fokus der Produktbetrachtung stehen für die Delta-Betrachtung nicht die Domänen, sondern die Produktmerkmale der verschiedenen Produktebenen im Fokus. Von einer isolierten Betrachtung ist analog der Delta-Betrachtung-Umwelt abzusehen. Infolge der Produktfokussierung ist die Datenerhebung nicht mit den domänenspezifischen Querschnittsfunktionen bzgl. Anlagentechnik, sondern mit den Entwicklern bzw. Produktplanern des neuen Produkts durchzuführen. In Abhängigkeit von der zu untersuchenden Anlagenebene (vgl. Kap. 6) sind verschiedene Produktmerkmale abzufragen. Die Bündelung der Anforderungen erfolgt für die Bauteile möglichst anlagenübergreifend, denn teilweise benötigen mehrere Montageumfänge gleiche Abfragen. Exemplarisch hierfür ist die Zugänglichkeit durch den Türenausschnitt für den Cockpit- oder Sitzeinbau. Für den Abgleich des Ist-/ Soll- Zustands sind sowohl Produkt- als auch Anlagenplaner und ggf. Querschnittsfunktionen wie die Qualitätssicherung erforderlich. Die Teilnehmer differenzieren in Abhängigkeit der unternehmensspezifischen Organisationsstruktur.

7.3.2 Konzipierung Fragenkatalog Delta-Engineering-Produkt

Auch der Fragenkatalog für den Abgleich des Produkts soll die Einflüsse auf die wiederzuverwendenden Anlagenumfänge möglichst vollständig erfassen. Für die Reduzierung des Aufwands des Abgleichs gilt es in diesem Fall, die bauteilspezifischen Einflüsse möglichst übergreifend zu erfassen (vgl. Abbildung 47) (Strathmann 2016).



Abbildung 47: Ablauf Konzipierung Checkliste - Montage

Resultierend werden im ersten Schritt die verschiedenen Produktmerkmale analysiert und den dafür erforderlichen Funktionalitäten der Ressourcenebene zugeordnet (vgl. Abbildung 33). Anschließend werden die Einflüsse der Montagefunktionen aus den

Bausteinen hinsichtlich der relevanten Produktmerkmale identifiziert. Abschließend werden die einzelnen identifizierten Einflüsse der jeweiligen Bauteilumfänge mit den Ressourcen verknüpft. Für die jeweiligen Ressourcenebenen ergibt sich folglich ein Fragenkatalog. Auf dieser Basis ist eine Delta-Betrachtung zwischen zwei Produkten

Im Folgenden erfolgt exemplarisch eine Herleitung des Fragenkatalogs für die Ebene der Arbeitseinheit. Dies bedingt im ersten Schritt eine Analyse der Montagefunktionen (vgl. Kap. 7.1.1) mit den dazugehörigen Funktionsumfängen hinsichtlich ihrer Verwendung in der automatisierten Montage. Exemplarisch hat die Ressourcenanalyse der automobilen Endmontage die in Abbildung 48 dargestellten Funktionsumfänge für bestehende Arbeitseinheiten ergeben.

		Montagefunktionen							
		Greifen	Entriegeln	Verfahren	Positionieren	Applizieren	Messen	Lösen	Fügen
Arbeitseinheit	Ausbau Türen	x		x	x			x	x
	Einbau Türen	x		x	x			x	x
	Einbau Cockpit	x	x	x	x			x	x
	Einbau Scheibe	x		x	x	x	x	x	x
	...								

Abbildung 48: Verknüpfung Arbeitseinheiten mit Montagefunktionen (Strathmann 2016, S. 52)

Den Funktionsumfängen werden anschließend die identifizierten Einflüsse, die hinsichtlich der Produktrelevanz zu filtern sind, entsprechend den Montageprozessbausteinen, zugewiesen. Für den Funktionsumfang „Applizieren von Klebstoff“ auf Bauteile wie beispielsweise bei Front-, Heck- sowie Seitenscheiben und geklebten Dachsystemen, haben sich die in Abbildung 49 dargestellten Produktmerkmale ergeben. Hierbei variiert der Einfluss der Produktmerkmale auf die Montagefunktion.



Abbildung 49: Herleitung der Cluster Produktmerkmale am Beispiel Applizieren (Strathmann 2016, S. 65)

Einzelne Produktmerkmale sind für mehrere Montagefunktionen relevant, andere Merkmale nur für eine spezifische. Insbesondere die Bauteilgeometrie oder auch die Produktvarianz haben Einfluss auf die Montagefunktionen, wie z.B. das Greifen oder auch das Entriegeln von Teileträgern. Nach der Herleitung der Produktmerkmale für alle Montagefunktionen lassen sich diese zu Merkmalsclustern zusammenfassen.

Mit der abschließenden Verknüpfung der Arbeitseinheits-Ebene mit den Produktmerkmalen bzw. Merkmalsclustern ergibt sich für jede Ressourcenebene ein Fragenkatalog. Bedingt durch den geringeren Merkmalsumfang im Vergleich zur Ressourcenumwelt lässt sich dieser auch in Form einer Checkliste darstellen (vgl. Abbildung 50). Die Checkliste basiert auf den elementaren Montageprozessbausteinen und Funktionsumfängen, ist jedoch anlagenspezifisch anzupassen.

Cluster Produktmerkmal		Produktmerkmal		Ist-/Soll Zustand						
		Montagefunktionen								
		Greifen/ Aufnehmen	Entriegeln	Verfahren/ Handhaben	Positionieren / Zentrieren	Applizieren	Messen	Fügen	Lösen/ Loslassen	
Geometrie Bauteil Freiraumprofil										
y-Absteckpunkte an beiden Schottplatten	Art Freiraum- profil	maximale Breite [mm]								
	Vorgabe									
	IST-Wert									
	Risiko									

Abbildung 50: Delta-Engineering-Produkt am Beispiel Einbau des Frontends

Anschließend sind sowohl für den Anlagenplaner als auch für den Produktplaner die relevanten Merkmale kompakt aufbereitet. Basierend auf den identifizierten relevanten Produktmerkmalen der bereits erprobten Produkte sind diese mit den zukünftigen abzugleichen. Intention ist es, die Anforderungen an das Produkt kompakt an die Produktentwicklung zu übergeben, deren Umsetzung im Produktentstehungsprozess zu begleiten sowie Abweichungen für die Risikobeurteilung zu identifizieren. In Analogie zum Delta-Engineering- Umwelt können die Abweichungen als Modifikationsanforderungen an die Gestaltung der Bibliotheksressourcen übermittelt werden.

7.4 Kennzahlen zur Beurteilung von Projektrisiken

Dieses Unterkapitel bildet die Grundlage für die globale sowie lokale Risikoanalyse. Im Folgenden wird hierfür die Bibliotheksstruktur erläutert. Gemeinsame Datenbasis der globalen wie auch lokalen Risikoanalysen sind die allgemeinen Projektrisikokennzahlen.

Bedingt durch die Spezifika der Analysen besteht neben diesen Kennzahlen eine separate Datenbasis für die lokale und globale Risikoanalyse. Den identifizierten Merkmalsträgern sind ein oder mehrere Merkmale in Form von Kennzahlen, welche Merkmalsausprägungen annehmen können, zugeordnet (Arbatschat 2016).

Der spätere Methodenanwender verantwortet die Pflege der Datensätze innerhalb der Bibliothek. Intention der Bibliotheksnutzung ist eine effiziente Arbeitsweise durch die Nutzung einer möglichst breiten Datenbasis und die Anpassung von Merkmalsausprägungen. Diese sind möglichst so vorzudefinieren, dass sie überschneidungsfrei bzw. disjunkt sind und alle potentiell möglichen Risikosituationen erschöpfend abbilden (Umlauf und Gradmann 2012). Anwendungsfallsspezifische Anpassungen sind nicht auszuschließen.

Der Anwender definiert die Ausprägungen der Kennzahlen durch eine probabilistische Hypothese bzgl. der vorliegenden Risikosituation. Basis der Hypothesenbildung bilden statistische Daten sowie das Expertenwissen (Gehring und Weins 2009). Für Datensätze zur Charakterisierung der Rahmenbedingungen, wie z.B. der Plankosten, ist eine Hypothesenbildung nicht erforderlich.

7.4.1 Allgemeine Projektrisikokennzahlen

Die im Folgenden beschriebenen allgemeinen Projektrisikokennzahlen dienen der Bestimmung der absoluten Wertausprägung der Projektkosten bzw. Projektterminüberschreitung für die relativen Ausprägungen der Risikoanalysen (vgl. Kap. 8). Die Erhebung der Kennzahlen erfolgt für den betrachteten Projektumfang sowie bereits realisierte Projekte (Arbatschat 2016).

Die Plankosten eines Ressourcenprojektes subsumieren „interne Kosten“ sowie „externe Dienst- und Sachleistungen“. Entsprechend der Granularität des Betrachtungsgegenstands ist auch eine feinere Untergliederung möglich. Dies kann bei der Betrachtung einzelner Projektstätigkeiten, wie z.B. der Konstruktion oder auch der Anfertigung der Ressourcenelemente, zielführend sein. Ergänzend sind die monetären wie auch zeitlichen Daten realisierter Projekte für die Analyse der Projektrisiken zu evaluieren.

Tabelle 6 umfasst die relevanten Projektrisikokennzahlen für die Analyse der Projektrisiken für R1-R5 (vgl. Kap. 3.3). Die numerische Ausprägung der Kennzahlen ist auf Basis deterministischer und statistischer Daten zu ermitteln.

Tabelle 6: Allgemeine Projektkennzahlen (Arbatschat 2016)

Kennzahl	Beschreibung	Einheit
Plankosten-Projekt Ressource		
A1	Interne Plankosten des Betriebsmittelprojekts	€
A2	Externe Plankosten des Betriebsmittelprojekts	€
A3	Plangesamtkosten des Betriebsmittelprojekts	€
monetäre Projektrisiken realisierter Projekte		
A4	x der relativen Projektkostenüberschreitungen $x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\text{Ist - Kosten abgeschlossenes Projekt } i}{\text{Plan - Kosten abgeschlossenes Projekt } i}$	%
A5	Anteil nachforderungsbedingter Projektkostenüberschreitungen	%
A6	Anteil anlaufbedingter Projektkostenüberschreitungen	%
A7	Anteil nacharbeitsbedingter Projektkostenüberschreitungen	%
A8	Anteil ausschussbedingter Projektkostenüberschreitungen	%
A9	Anteil stillstandbedingter Projektkostenüberschreitungen	%
Plandauer-Projekt Ressourcenelement		
A10	Plandauer des Betriebsmittelprojekts	KW
Zeitbezogene Projektrisiken realisierter Projekte		
A11	Durchschnittliche relative Projektterminüberschreitungen	%
A12	Anteil nachforderungsbedingter Projektterminüberschreitungen	%
A13	Anteil anlaufbedingter Projektterminüberschreitungen	%
A14	Anteil nacharbeitsbedingter Projektterminüberschreitungen	%
A15	Anteil ausschussbedingter Projektterminüberschreitungen	%
A16	Anteil stillstandbedingter Projektterminüberschreitungen	%

7.4.2 Globale Projektrisikokennzahlen

Neben den allgemeinen Projektkennzahlen sind für die Analyse der allgemeinen Risikosituation die Risikokennzahlen B_i zu charakterisieren. In diesem Zusammenhang sind für die Bestimmung der Projektrisiken PR1-PR5 (vgl. Abbildung 20) die relevanten Einflüsse zu ermitteln. Die Risiken werden entsprechend des PPR-Modells (vgl. Kap. 2.1.1) aus dem Produkt, dem Prozess, den Ressourcen sowie den Engineering Skills induziert (vgl. Abbildung 51).

**Abbildung 51: Ursachen technischer Projektrisiken im Anlagenbau**

Die Bewertung der Risiken aus den Ressourcen durch die Umwelt und die Ressourcenelemente sowie den Produkten ergibt sich aus dem Delta-Engineering, u.a. aus dem

Neuerungsgrad (vgl. Kap. 7.2 und 7.3) sowie der Komplexität des Projektes. Der Neuerungsgrad ist hinsichtlich des Produkts, der Umwelt sowie der Ressource selbst zu differenzieren. Der Modifikationsumfang zwischen den Projekten sowie die Projektkomplexität bilden somit potentielle Fehlerursachen und erhöhen das Risiko. Neben den technischen Rahmenbedingungen ist auch die Expertise des Anlagenbauers entscheidend. Die spezifische Wirkung der Fehlerursachen ergibt sich u.a. aus der Systemumgebung (vgl. Abbildung 34).

Für eine effiziente sowie konsistente Erfassung der Merkmalsausprägung ist die Nutzung von Bewertungskatalogen vorteilhaft. Für diese Arbeit wird exemplarisch der in Tabelle 7 definierte Bewertungskatalog, der fallspezifisch anzupassen ist, herangezogen.

Tabelle 7: Exemplarischer Bewertungskatalog für Merkmalsausprägung (VDA 4-2, S. 119)

Kennzahl		Erläuterung
Verbal	numerisch	
hoch	3	Neuentwicklung eines Elements ohne Erfahrungen/ bekannte Betriebsmittelkonstruktion, bei der bisher ungelöste Probleme auftreten
mäßig	2	Neuentwicklung einzelner Betriebsmittelkomponenten, die auf bisher nicht abgesicherten Technologien basieren
gering	1	Neuentwicklung einzelner Betriebsmittelkomponenten, die mithilfe von Test- und Prüfverfahren hinreichend getestet wurden/ bewährtes System mit langjähriger schadensfreier Serienerfahrung

Die Kennzahlen können die Ausprägungen: „hoch“, „mittel“ und „gering“ annehmen. Die Bestimmung der Kennzahlenausprägung erfolgt mithilfe der deterministischen Hypothesenbildung. Tabelle 7 dient als Bewertungskatalog für die Kennzahlenwerte des Modifikationsumfangs.

In Tabelle 8 ist die Struktur der globalen Projektrisikokennzahlen bzgl. der Projektrisiken PR1 – PR5 beispielhaft auf der Ressourcenebene Arbeitseinheit abgebildet. Jeder Kennzahl ist exemplarisch ein Gewichtungsfaktor, der auf einem Paarweisen Vergleich basiert (vgl. Kap. 8.1), zugeordnet.

Die Höhe des Modifikationsumfangs hinsichtlich der Ressource definiert sich aus dem Änderungsmanagement (vgl. Kap. 5.2.3). Hingegen leitet sich die Komplexität der Ressource aus dem Funktionsumfang sowie der Verknüpfung der Funktionen ab. Zur näheren Spezifikation der Modifikationsumfänge hinsichtlich der Werksumgebung können die identifizierten Schnittstellen des Ressourcenelements herangezogen werden

(vgl. Kap. 7.2). In Analogie zur Werksumgebung können auch die Abweichungen bzgl. der Produktmerkmalscluster (vgl. Kap. 7.3) bestimmt werden.

Tabelle 8: Globale Risikokennzahlen B_i mit exemplarischen Kennzahlwerten (Arbatschat 2016)

PR	Merkmals-träger	Kennzahl		Kenn-zahl-wert	Wich-tung	Gewichteter Kennzahl-wert
		Nr.	Benennung			
PR1	Betriebs-mittel	B1	Modifikationsumfang	3	0,8	2,8
		B2	Komplexitätsgrad	2	0,2	
	Werksumge-bung	B3	Abweichung Hallen- struktur	2	0,3	2,0
		B4	Abweichung Logistik	2	0,15	
		B5	Abweichung Medien- versorgung	2	0,3	
		B6	Abweichung Förder- technik	2	0,1	
		B7	Abweichung Informati- onsfluss	2	0,15	
	Produkt/ Bauteil	B8	Abweichung Bauteilmateri- al	1	0,2	1,8
		B9	Abweichung Bauteilge- wicht	2	0,2	
		B10	Abweichung Bauteilge- ometrie	2	0,2	
		B11	Abweichung Montage- konzept	2	0,2	
		B12	Abweichung Varianten- anzahl	2	0,2	
	Lieferant	B13	Grad der technischen Expertise	3	0,5	2,5
		B14	Grad der Kundenkom- petenz	2	0,5	
PR2	PR1	B1- B14	gewichteter Kennzahl- wert PR1	2	0,7	1,4
	Prozess	B15	Automatisierungsgrad	1	0,5	2,0
		B16	Verbaurrate	3	0,5	
PR3/4	PR1	B1- B14	gewichteter Kennzahl- wert PR1	2	0,7	1,4
	Prozess	B16	Wertschöpfungsanteil	2	0,5	2,5
		B17	Betriebsmittelreparatur- dauer	3	0,5	
PR5	PR1	B1- B14	gewichteter Kennzahl- wert PR1	2	0,7	1,4
	Prozess	B17	Betriebsmittelreparatur- dauer	2	0,5	2,0
		B19	Anlaufdauer Notstrate- gie	2	0,5	

Für die Bestimmung der Engineering Skills des Lieferanten können die technische Expertise auf Basis ähnlicher Projekte sowie der Grad der allgemeinen Kundenkompetenz auf Basis der bisherigen Zusammenarbeit genutzt werden.

Für die Bestimmung des Risikos nachträglicher Ressourcenanpassungen werden die bisherigen Kennzahlen herangezogen, die prozessuale Einbindung der Ressource jedoch nicht. Die Ermittlung der außerplanmäßigen Anlaufbegleitung setzt hingegen eine zusätzliche Betrachtung des Prozesses voraus. Primäre Einflüsse bilden der Automatisierungsgrad sowie der durchschnittliche Bedarf des Ressourcenelements je Fahrzeug.

Die Risiken hinsichtlich Nacharbeit und Ausschuss durch die Ressourcenelemente ergeben sich durch die mangelnde Prozessfähigkeit der Ressource, die eine Ressourcenanpassung nötig macht. Die Intensität des Risikos hängt resultierend von der Modifikationsdauer bis zur Einstellung der gewünschten Prozessfähigkeit sowie der Einbindung der Ressource in die Wertschöpfung ab.

Für die Bewertung des Risikos durch Stillstand können die Prozessgüte der Notstrategie hinsichtlich des Outputs, die Anlaufdauer der Notstrategie sowie die Reparaturdauer herangezogen werden. Betrachtungsgegenstand sind ausschließlich Stillstände innerhalb des Projektzeitraums, die von einer Fehlfunktion des Ressourcenelements ausgehen.

7.4.3 Lokale Projektrisikokennzahlen

Die lokale Risikoanalyse (vgl. Kap. 8.2) baut auf den lokalen Risikokennzahlen C_i , die nachfolgend erläutert werden, auf. Diese erlauben eine Quantifizierung der Projektrisiken der wiederverwendeten Elemente. Für jede Fehlfunktion i Elemente sind die in Tabelle 9 definierten Kennzahlen zu definieren.

Tabelle 9: Lokale Risikokennzahlen C_i (Arbatschat 2016)

Kennzahl	Beschreibung	Einheit
$\sum_{i=1}^n C1_i$	Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion	%
$\sum_{i=1}^n C2_i$	Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlfunktion	%
$\sum_{i=1}^n C3_i$	Potentieller Entdeckungszeitpunkt der Fehlfunktion	[d]
$C4$	Plankosten des betrachteten kritischen Projektumfangs	[€]
$C5$	Personalkostensatz (Anlaufbegleitung)	[€/h]
$C6$	Ergebnisbeitrag pro Fahrzeug	[€/Fzg.]
$C7$	Anzahl der gefertigten Fahrzeuge pro Stunde – JPH	[Fzg./h]
$C8$	Reparaturdauer	[h]
$C9$	Nacharbeitskosten	[€/Fzg.]
$C10$	Ausschusskosten	[€/Fzg.]
$C11$	vom Fehlerauftritt bis zur Maßnahmeneinleitung	[h]

Die Ermittlung der Kennzahlen $\sum_{i=1}^n C1_i$ und $\sum_{i=1}^n C2_i$ erfolgt auf Basis eines Bewertungskatalogs durch die jeweiligen Fachexperten (VDA 4-2, S. 119). Hingegen ergibt sich die Kennzahl $\sum_{i=1}^n C3_i$ aus dem Projektterminplan. Der Zeitpunkt der Funktionsprüfung stellt einen wesentlichen Stellhebel zur Minimierung der Projektrisiken dar.

Abbildung 52 visualisiert den Zusammenhang zwischen präventiven Maßnahmen und den resultierenden Projektrisiken PR1-PR5. Die frühzeitige Fehleridentifizierung ermöglicht durch die Einleitung präventiver Maßnahmen im frühen Projektstadium die Minimierung der Risiken für das Projekt. Beispielsweise bedingen Fehler, die bei der Erprobung von Ressourcen beim Lieferanten identifiziert werden, Überarbeitungen der Ressourcen, rufen jedoch keine Stillstandskosten in der Fertigung hervor.

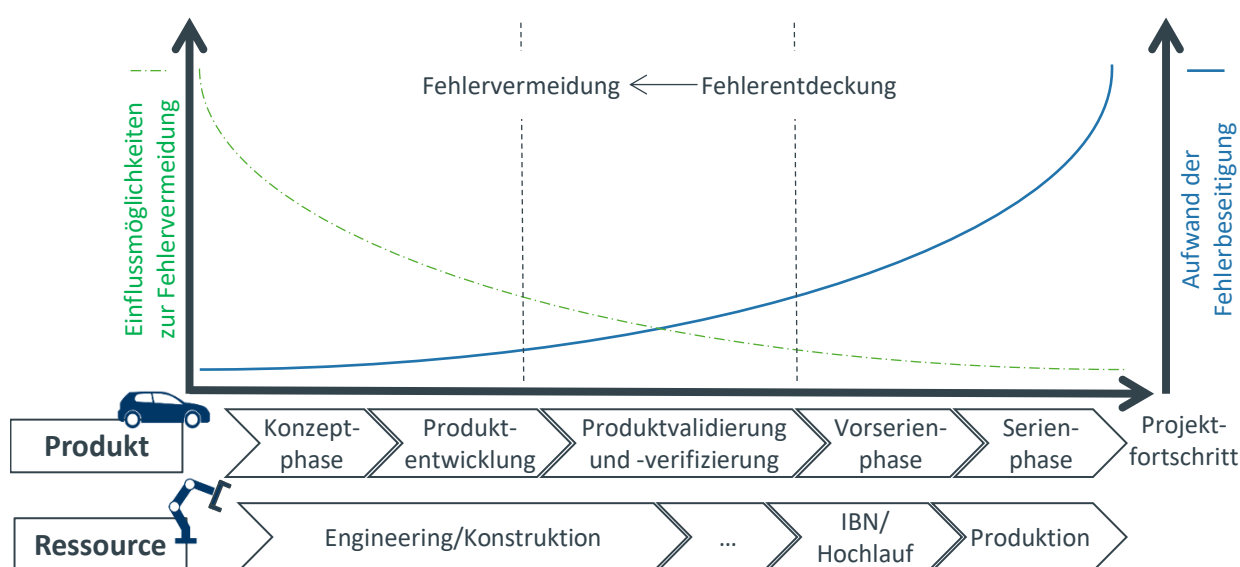


Abbildung 52: Fehlerbeeinflussung im Produktlebenszyklus Fehlerbeeinflussung im Produktlebenszyklus (VDA 14, S. 11)

Zur Ermittlung der absoluten Wertausprägungen (vgl. Kap. 8.2) der Projektrisiken eines Betrachtungsumfangs bedarf es darüber hinaus der Bestimmung weiterer Kennzahlen. Hierbei ist zwischen umfangsspezifischen Kennzahlen ($C4$, $C8$, $C9$ und $C10$), deren Grundlage statistische Daten bzw. Expertenbefragungen bilden, sowie projektübergreifenden Kennzahlen aus den Rahmenbedingungen des Projektes ($C5$, $C6$ und $C7$) zu differenzieren.

8 Risikoanalyse bei der Wiederverwendung von Entwurfselement

Auf Grundlage der Eingangsdaten der Risikoidentifizierung (vgl. Kap. 7) erfolgt die Ableitung der Methodik zur Risikoanalyse bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering (vgl. Abbildung 53). In diesem Zusammenhang wird die nächste Schale innerhalb des Modells erarbeitet (Arbatschat 2016).

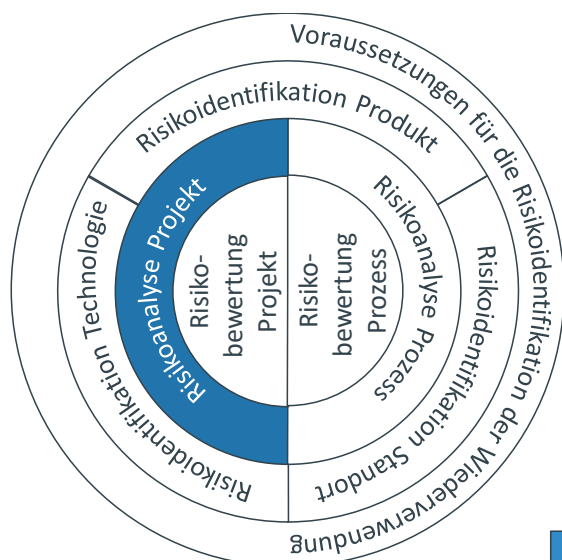


Abbildung 53: Einordnung des Kapitels 8 in den Forschungskontext

Das Kapitel gliedert sich sowohl in eine globale als auch lokale Risikoanalyse (vgl. Kap. 5.1.1). Einerseits sind die Informationen für die globale Risikobewertung aufzubereiten, andererseits sind diese für eine lokale Risikobewertung entsprechend darzustellen. Weiterhin gilt es im Rahmen der lokalen Risikoanalyse folgende Forschungsfrage zu beantworten.

Welches Risikomodell ist für die Abbildung der Interdependenzen innerhalb eines Betriebsmittelprojektes geeignet?

8.1 Global

Die Risikoanalyse dient sowohl der Quantifizierung der monetären Projektrisiken (PR-K) als auch der zeitlichen Projektrisiken (PR-Z) hinsichtlich des Gesamtrisikos oder der Risikoklassen. Die Analyse fußt auf der Monte-Carlo-Simulation (vgl. Kap. 5.1.2) und hat eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion zur Visualisierung der Projektrisikospanne als Ausgangsgröße. Die Erläuterung der Vorgehensweise erfolgt am Beispiel der monetären Projektrisiken. Eingangs ist der Betrachtungsumfang der globalen Risikoanalyse inklusive der erforderlichen Risikoklassen zu definieren. Für die Analyse wird anschließend auf die allgemeinen sowie globalen Risikokennzahlen zurückgegriffen (vgl. Kap. 7.4). Die Darstellung erfolgt exemplarisch am Risiko „Nachträgliche Anlagenanpassung“.

Im Vorfeld der Monte-Carlo-Simulation, die eine Prognose der ermittelten Wahrscheinlichkeitsverteilungen aggregiert, sind die Risikoverteilungen für die jeweiligen Risikoklassen zu ermitteln. Hierfür wird das „Relative Risk Weighting-Verfahren“ (vgl. Kap. 5.1.2) eingesetzt, das die aggregierten Kennzahlenwerte der Merkmalsträger in eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion überführt.

Im ersten Schritt ist eine Gewichtung der Merkmalsträger zur Bestimmung des Risikoeinflusses eines Merkmalsträgers auf das betrachtete Projektrisiko zu bestimmen. Zu diesem Zweck erfolgt ein Paarweiser Vergleich (Skala vgl. (Greenberg 2014)) durch Experten in einem interdisziplinären Team aus Methodenexperten, Anlagenplanern, Anlagenlieferanten sowie den späteren Anlagenbetreibern (vgl. Tabelle 10). Ergänzend kann für die Konsistenzplausibilisierung auch der Analytische Hierarchie Prozess herangezogen werden (Zimmermann und Gutsche 1991) (Schneeweiß 1991).

Tabelle 10: Absoluter Vergleich der Merkmalsträger des Projektrisikos PR1-K

Merkmalsträger	Ressource	Umwelt	Produkt	Lieferant	Rang
Ressource	1	5	6	9	1
Umwelt	1/5	1	4	3	2
Produkt	1/7	1/4	1	5	3
Lieferant	1/7	1/3	1/5		4
Summe	1,49	6,58	11,20	18,00	--

Die Gewichtungsfaktoren der Merkmalsträger sind zu normieren, um ihren relativen Anteil am Projektrisiko zu ermitteln. Aus dem arithmetischen Mittel der Zeilen der Vergleichsmatrix ergeben sich anschließend die Gewichtungsfaktoren der Merkmalsträger g_i (vgl. Tabelle 11). Im Beispiel ist die Ressource der dominierende Einfluss auf das Projektrisiko.

Tabelle 11: Normierter Vergleich der Merkmalsträger des Projektrisikos PR1-K

Merkmals-träger	Ressource	Umwelt	Produkt	Lieferant	Gewichtungsfaktor g_i
Ressource	0,67	0,76	0,54	0,5	61,71 %
Umwelt	0,13	0,15	0,36	0,17	20,26 %
Produkt	0,1	0,04	0,09	0,28	12,53 %
Lieferant	0,1	0,05	0,02	0,06	5,50 %
Summe	1,00	1,00	1,00	1,00	100 %

Im nächsten Schritt sind die Risikoszenarien auf Grundlage der vorherigen Kennzahlen-gewichtung der Merkmalsträger (vgl. Tabelle 9) zu ermitteln. Die Szenarien umfassen:

- ein „Best-Case-Szenario“ (potentiell minimale Risikofolgen),
- ein „Wahrscheinliches Szenario“ (wahrscheinlichste Risikofolgen) und
- ein „Worst-Case-Szenario“, das die potentiell größten Risikofolgen abbildet.

Die globalen Risikokennzahlen (vgl. Kap. 7.4.2) können die diskreten Ausprägungen 1, 2 oder 3 annehmen. Resultierend ergibt sich für die Merkmalsträger ein definiertes Intervall [1,3]. Die Risikointensität ist auf einer Skala mit sieben äquidistanten Werteklassen abzubilden. Die Risikoszenarien eines Merkmalsträgers berechnen sich wie folgt:

- *Best – Case – Szenario* = $BCS * \text{Normierte Risikointensität}$
- *Wahrscheinliches Szenario* = $WHS * \text{Normierte Risikointensität}$
- *Worst – Case – Szenario* = $WCS * \text{Normierte Risikointensität}$

Als Parameter wird der fixe Wert 1 für das wahrscheinlichste Szenario angenommen. Hingegen sind die Parameter für das Best-Case- sowie Worst-Case-Szenario innerhalb der Intervalle (vgl. Tabelle 12) frei zu wählen.

Tabelle 12: Exemplarische Risikointensitätsskala

Kennzahlenwert Merkmalsträger	Risikointensität		
	verbal	(numerisch)	normiert
$1,00 \leq x < 1,28$	sehr gering	1	0,036
$1,28 \leq x < 1,57$	gering	2	0,071
$1,57 \leq x < 1,86$	mäßig gering	3	0,107
$1,86 \leq x < 2,14$	mäßig	4	0,143
$2,14 \leq x < 2,43$	mäßig hoch	5	0,179
$2,14 \leq x < 2,71$	hoch	6	0,214
$2,71 \leq x \leq 3$	sehr hoch	7	0,250
Best-Case-Szenario [$0 < BCS < 1$]			0,3
Wahrscheinliches Szenario [1]			1
Worst-Case-Szenario [$1 < WCS < \infty$]			3

Zur Realisierung einer hohen Risikobandbreite sollte mit steigendem Ungewissheitsgrad das Best-Case-Szenario kleinere und das Worst-Case-Szenario größere Werte annehmen. Für das Fallbeispiel PR1-K wurden das Best-Case-Szenario mit 0,3 und das Worst-Case-Szenario mit 3 parametrisiert. Der gewichtete Kennzahlenwert der Merkmalsausprägung Betriebsmittel von 2,8 (vgl. Tabelle 8 und Tabelle 12) entspricht einer normierten Risikointensität von 0,25. Auf dieser Basis ist eine Ableitung der Risikoszenarien für das Risiko PR1-K möglich.

- *Best – Case – Szenario* = $0,3 * 0,25 = 0,075$
- *Wahrscheinliches Szenario* = $1 * 0,25 = 0,25$
- *Worst – Case – Szenario* = $3 * 0,25 = 0,75$

Nun gilt es, die relativen Eckpunkte der Dreiecksverteilung des Risikos PR1-K abzuleiten. Zu diesem Zweck werden für alle Merkmalsträger das Summenprodukt g_i (vgl. Tabelle

11) und die Werte der Risikoszenarien (vgl. Tabelle 12) ermittelt. Die Dreiecksverteilung der Summenprodukte wird durch die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion charakterisiert:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2 * (x - a)}{(c - a) * (b - a)} \text{ für } a \leq x < b \\ \frac{2}{c - a} \text{ für } x = b \\ \frac{2 * (c - x)}{(c - a) * (c - b)} \text{ für } b < x \leq c \end{cases}$$

Zur Bestimmung des Risikos der Kostenüberschreitung erfolgt die Ermittlung der relativen Eckpunkte a_{rel} , b_{rel} und c_{rel} (vgl. Tabelle 13) der Dreiecksverteilung wie folgt:

$$a_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * BSC_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i} - \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * BSC_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i}$$

$$b_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i} - \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * BSC_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i}$$

$$c_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * WCS_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i} - \frac{\sum_{i=1}^4 g_i * BSC_i}{\sum_{i=1}^4 g_i * WHS_i}$$

Tabelle 13: Relative Eckpunkte der Dreiecksverteilung PR1-K

Merkmalsträger	Res- source	Umwelt	Produkt	Lieferant	Summen- produkt	Eckpunkte Dreiecksverteilung	
Gewichtungsfaktor g_i	0,617	0,203	0,125	0,055			
BCS	0,075	0,043	0,032	0,064	0,063	a_{rel}	0,00
WHS	0,250	0,143	0,107	0,214	0,208	b_{rel}	0,70
WCS	0,750	0,429	0,321	0,643	0,625	c_{rel}	2,7

Anschließend gilt es aus den relativen Eckpunkten a_{rel} , b_{rel} und c_{rel} absolute Werte auf Basis der allgemeinen Projektrisikokennzahlen A_i (vgl. Kap. 7.4.1) für das Risiko PR1-K zu bestimmen. Hierfür wird der Basiswert mit den relativen Eckpunkten multipliziert. Für die exemplarische Berechnung werden folgende Ausprägungen der Kennzahlen $A3=1.000.000\text{€}$, $A4=02$, $A5=0,6$ angenommen.

$$\text{Basiswert} = A1 * A2 * A3 = 1.000.000 \text{ €} * 0,25 * 0,6 = 120.000 \text{ €}$$

$$a_{abs} = a_{rel} * \text{Basiswert} = 0 * 120.000\text{€} = 0\text{€}$$

$$b_{abs} = b_{rel} * \text{Basiswert} = 0,7 * 120.000\text{€} = 84.000 \text{ €}$$

$$c_{abs} = c_{rel} * \text{Basiswert} = 2,7 * 120.000\text{€} = 324.000 \text{ €}$$

Eine Aussage bzgl. des Projektgesamtrisikos erfolgt über die Aggregation der ermittelten Dreiecksverteilungen durch eine Monte-Carlo-Simulation. Der Anwender muss hierfür im

jeweiligen Simulationstool den Verteilungstyp „Dreiecksverteilung“ sowie die jeweiligen ermittelten Eckpunkte a_{abs} , b_{abs} und c_{abs} parametrisieren. Die definierten Dreiecksverteilungen werden anschließend durch die Monte-Carlo-Simulation aggregiert. Die Ausgabe kann als diskrete Häufigkeitsverteilung für kosten- oder zeitbezogene Projektrisiken erfolgen. Abbildung 54 visualisiert exemplarisch das Histogramm einer 100.000 Simulationszyklen umfassenden Monte-Carlo-Simulation der Dreiecksverteilung des Projektrisikos PR1-K. Weiterhin sind die Projektkosten bzw. die Projektdauer im angenommenen Beispiel als Gleichverteilung modellierbar. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation dienen als Grundlage für die Risikobewertung in Kapitel 9.2.

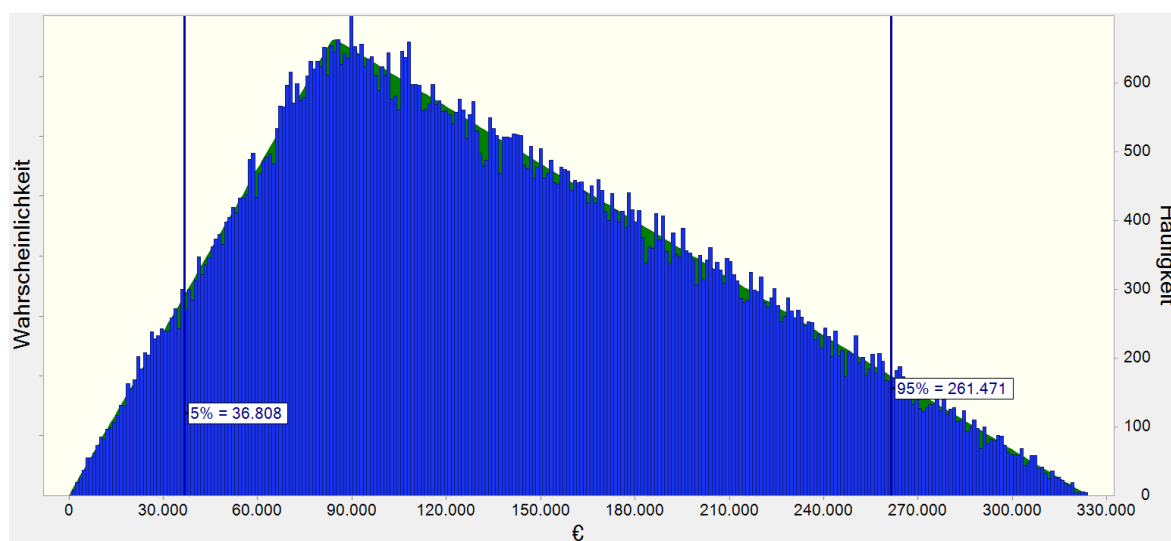


Abbildung 54: Histogramm Monte-Carlo-Simulation für PR1-K mit der Software Crystall Ball (Oracle)

8.2 Lokal

Auf Basis der lokalen Projektrisikokennzahlen in Kapitel 0 kann eine zeitvariante und maßnahmenabhängige Quantifizierung der Projektrisiken der Elemente erfolgen. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit von Alternativen. Die Modellierung der Risikosituationen erfolgt mithilfe von Bayes'schen Netzen (vgl. Kap. 5.1.3). Das Modell leitet sich aus der Risikodefinition für Projektrisiken (vgl. Abbildung 20) sowie der zeitvarianten Charakteristik des Projektrisikos (vgl. Abbildung 30) her. Ausgehend von einer Entscheidungssituation ist zwischen verschiedenen Entscheidungsvarianten mit einer definierten Auftretenswahrscheinlichkeit für Risiken auszuwählen. Zu einem bestimmten Zeitpunkt resultieren verschiedene Risiken in Abhängigkeit von den umgesetzten Maßnahmen zur Risikominimierung. In Abbildung 55 ist die Struktur der Bayes'schen Netzen mit drei Ebenen zur Ableitung von Projektrisiken dargestellt.

Die Ebene 1 subsumiert die drei Entscheidungsknoten zur Abbildung der Risikosituation:

- **Variante:** Umfasst die Gesamtheit der potentiellen Varianten eines Elements, beispielsweise die verschiedenen Ausführungen einer Komponente,
- **Maßnahme:** Repräsentiert alle potentiellen Entdeckungsmaßnahmen zur Identifizierung von Fehlerfunktionen eines Elements und
- **Zeitpunkt:** Enthält alle Zeitpunkte des Projekts, zu denen die Ergebnisse der Prüfmaßnahmen vorliegen.

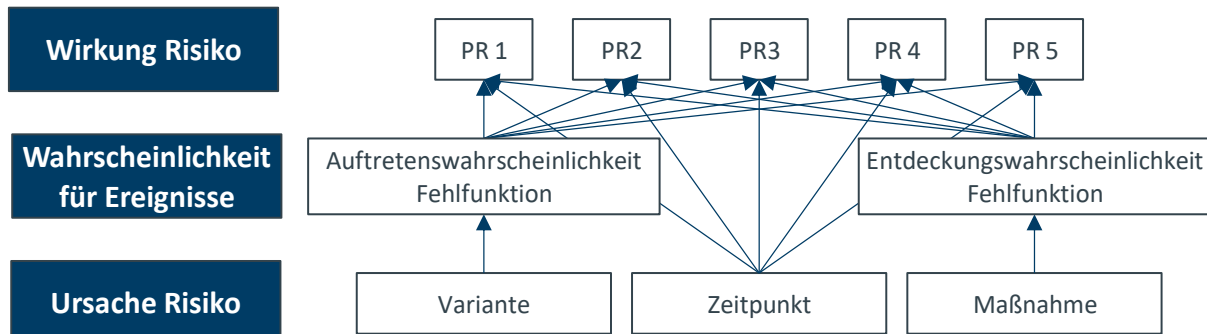


Abbildung 55: Struktur Bayes'scher Netze für die lokale Risikoanalyse

Hingegen umfasst die zweite Ebene die Wahrscheinlichkeiten des Auftretens und der Entdeckung der Fehlfunktion, „A_WKT“ und „E_WKT“, des Elements. Die A-priori-Wahrscheinlichkeiten resultieren aus der Parametrierung der Knoten auf Basis der Kennzahlen $\sum_{i=1}^n C1_i$ sowie $\sum_{i=1}^n C2_i$ (vgl. Kap. 0) und repräsentieren folglich die spezifische Risikosituation.

Auf der dritten Ebene werden die A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten der Projektrisiken „PR1“ bis „PR5“ abgebildet. Die Eingangsdaten basieren auf Expertenwissen.

Aus der Multiplikation der resultierenden A-posteriori-Wahrscheinlichkeiten mit den jeweiligen Projektkennzahlen ($C4_i$ - $C9_i$) ergibt sich anschließend der Erwartungswert für die Projektrisiken (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Erwartungswert lokales Projektrisikos

Risikoklasse	Gleichung
Anlagenanpassung	$PR1 - K [\text{€}] = PR1 (\text{"ja"})[\%] * C4 [\text{€}]$
Anlaufbegleitung	$PR2 - K [\text{€}] = PR2 (\text{"ja"}) * C5 \left[\frac{\text{€}}{h} \right] * C9 [h]$
Nacharbeit	$PR3 - K [\text{€}] = PR3 (\text{"ja"}) * C9 \left[\frac{\text{€}}{FZG} \right] * C7 \left[\frac{FZG}{h} \right] * (C8 + C11)[h]$
Ausschuss	$PR4 - K [\text{€}] = P4 (\text{"ja"}) * C10 \left[\frac{\text{€}}{FZG} \right] * C7 \left[\frac{FZG}{h} \right] * (C8 + C11)[h]$

Stillstand (Opportunitätskosten)

$$PR5 - K [\text{€}] = P5 ("ja") * C6 \left[\frac{\text{€}}{FZG} \right] * C7 \left[\frac{FZG}{h} \right] * (C8 + C11)[h]$$

In Abbildung 56 ist exemplarisch ein Bayes'sches Netz mit jeweils drei alternativen Varianten $\sum_{i=1}^3 C1_i$, Maßnahmen $\sum_{i=1}^3 C2_i$ sowie Erprobungszeitpunkten $\sum_{i=1}^3 C3_i$ dargestellt.

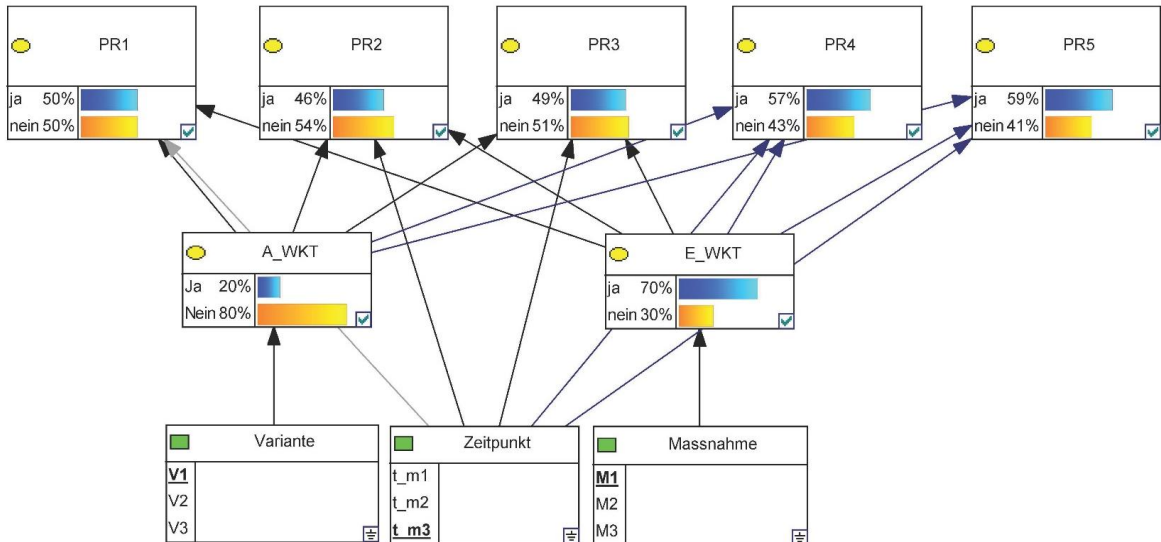


Abbildung 56: Visualisierung lokales Projektrisiko mit der Software Geni (Bayes-Fusion)

9 Risikobewertung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen

Nachdem die Risiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert (vgl. Kap. 7) sowie analysiert (vgl. Kap. 8) wurden, gilt es diese abschließend zu bewerten. Hierfür ist eine Untergliederung des Kapitels analog der Risiken in Projekt- sowie Prozessbewertung erforderlich (vgl. Abbildung 57).

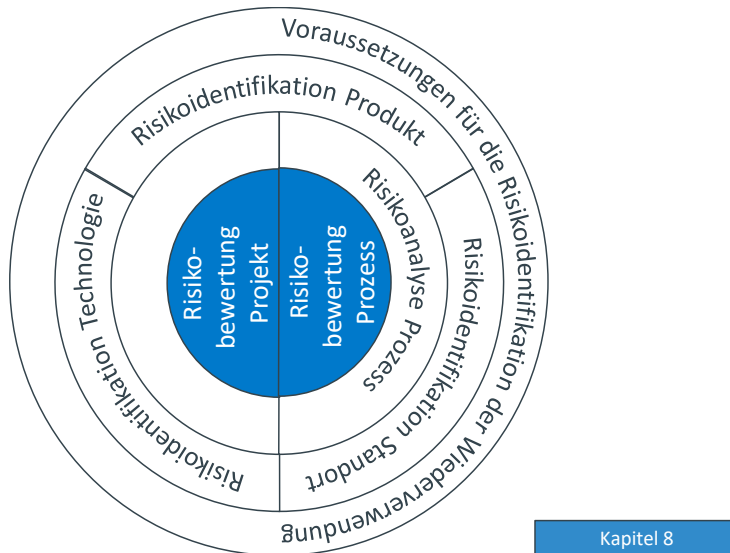


Abbildung 57: Einordnung des Kapitels 9 in den Forschungskontext

Eingangs erfolgt die Beantwortung der Forschungsfrage bzgl. der qualitativen Bewertung von Prozessrisiken.

„Wie können die Prozessrisiken bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen objektiv beurteilt werden?“

Im Fokus des Projektes stehen die globale sowie lokale quantitative Risikobeurteilung der Projektrisiken mit der Beantwortung folgender Forschungsfragen.

Wie können die Risiken von Realisierungsoptionen zu Projektbeginn bestimmt werden?

Wie können die Wechselwirkungen von Entscheidungen dynamisch innerhalb des Betriebsmittelprojektes bewertet werden?

9.1 Risikobewertung von Fertigungsprozessen im Anlagenengineering

Auf Basis des Handlungsbedarfs bzgl. der Definition von Grenzwerten gilt es im Folgenden, einen neuen Bewertungsansatz abzuleiten. Die Entwicklung fußt auf der VDA-Risikomatrix (VDA 4-2), dem Risikowürfel (König 2008) sowie dem 3D-Ampel-Faktor (Werdich 2012). Im Sinne einer validen Risikobewertung ist sowohl Objektivität als auch

Reliabilität für die 1000 A-B-E Wertepaare zu gewährleisten (vgl. Tabelle 5). Beide Kriterien werden durch die inhaltliche Gestaltung der Bewertungskataloge für die A-, B- und E-Werte, die eine eindeutige Differenzierung zwischen den Bewertungskategorien ermöglichen müssen, beeinflusst. Intention der vorgestellten Ableitungsmethodik ist eine allgemeine sowie praxistaugliche Ableitung der Grenzwerte, da die Bewertungskataloge häufig Firmen- sowie Projektspezifika aufweisen. Die Kategorisierung erfolgt exemplarisch am VDA-Bewertungskatalog (VDA 4-2, S. 119). Resultierend sind die Grenzen nicht als Dogmen zu sehen, sondern anwendungsfallspezifisch anzupassen. Die Entwicklung des Risiko-Kubus erfolgt in einem iterativen Prozess (vgl. Abbildung 58), der mehrmals durchlaufen wird. Im Folgenden wird das Vorgehensmodell mit exemplarischen Ausprägungen aufgrund der Vertraulichkeit gewählt.

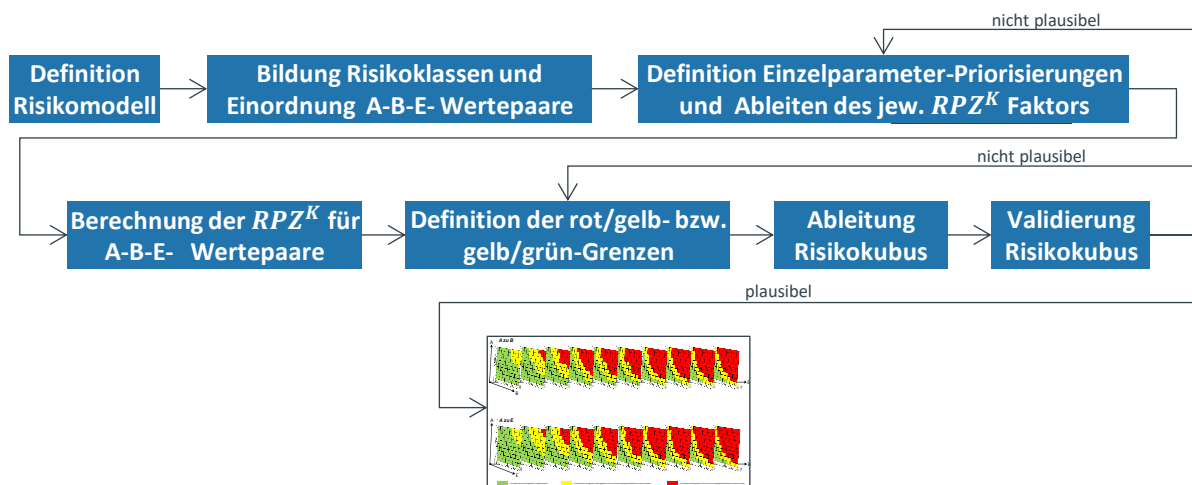


Abbildung 58: Vorgehensmodell Ableitung Risikokubus

Zur Präzisierung des Risikos muss sowohl die Höhe der Risikoprioritätszahl als auch die Kombinatorik der A-, B- sowie E-Werte Berücksichtigung finden. In Analogie zu (König 2008) werden zu Beginn die Risiken in Abhängigkeit der Lage innerhalb des Risikowürfels mittels Lage-Faktor gewichtet. Die Kombinatorik aus der Lage sowie der Risikoprioritätszahl wird durch die RPZ^K beschrieben.

$$RPZ^K = \text{Lagefaktor} * RPZ$$

Der Lagefaktor ergibt sich aus der Clusterung des Risikowürfels in Risikoklassen. Die Auflösung der Clusterung ist für die spätere Ableitung der Grenzen essenziell. Mit einer groben Clusterung der Skalen, wie beispielsweise bei König in zwei Hälften, geht ein großer Informationsverlust einher. Hingegen steigt der Aufwand zur Charakterisierung der Cluster mit zunehmender Unterteilung der Skalen exponentiell (Röpke et al. 2015). In der praktischen Anwendung hat sich eine Clusterung der Skalen in drei Bereiche als

zielführend erwiesen. Resultierend entsteht ein Kubus mit 27 Risikoklassen. Der Lagefaktor resultiert aus der Summierung der gewichteten A-, B- und E-Werte. Für die Wichtung der Faktoren werden die Skalenbereiche sowie die Wichtungsfaktoren für die A-,B- und E-Werte multipliziert. Im Rahmen der ersten Iterationsschleife bilden sich die Wichtungsfaktoren der A-, B- sowie E-Werte aus einem Paarweisen Vergleich durch eine hinsichtlich der Expertise möglichst homogene Gruppe aus FMEA-Moderatoren. Abbildung 59 zeigt, dass die RPZ^K die verschiedenen Bedeutungen gleicher Risikoprioritätszahl-Werte durch unterschiedliche A-,B- sowie E-Werte abbildet.

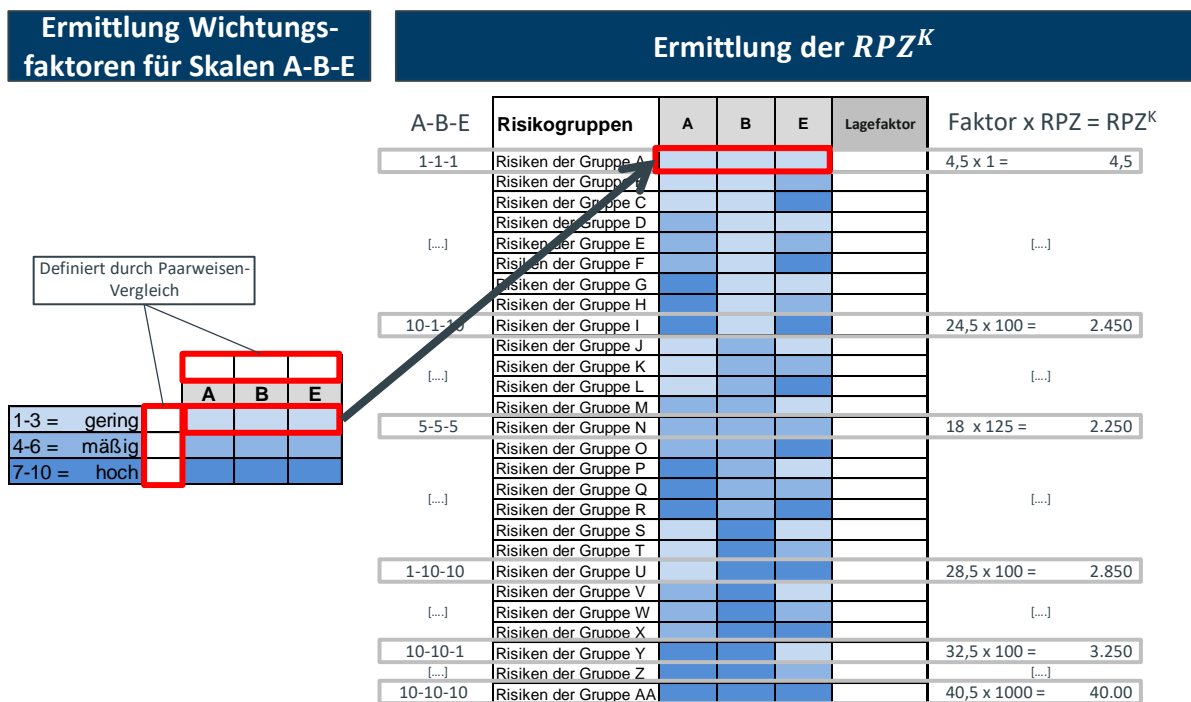


Abbildung 59: Ermittlung RPZ^K

Mithilfe von Lagefaktoren kann die RPZ^K für die 1000 A-, B- und E-Wertepaare ermittelt werden, die es im Folgenden zu klassifizieren gilt. Die Klassifizierungsansätze orientieren sich an der VDA-Matrix (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Risikoklassen

Risikoklasse	Anteil Pareto-Analyse [%]	Bedeutung
Grün	5	Es besteht kein Handlungsbedarf, Freigabe möglich.
Gelb	15	Es besteht kein zwingender Handlungsbedarf, Risiko sollte durch geeignete Maßnahmen reduziert werden.
Rot	80	Es besteht Handlungsbedarf, Risiko muss durch geeignete Maßnahmen reduziert werden.

Die Grenzen zwischen den Klassen resultieren aus der Pareto-Analyse für die RPZ^K , wobei die Kategorie der Pareto-Analyse die Risikoklassen repräsentieren. Für die Grenzwerte der Analyse werden für die erste Iterationsschleife exemplarisch 80% als A/B-Grenze sowie 95% als B/C Grenze angenommen (vgl. (Winz 2016) (Kamiske und Brauer 2011) (Pfeifer und Schmitt 2008)). Die Grenzwerte sind nicht fest definiert und können bei Bedarf in den Iterationsschleifen korrigiert werden (vgl. Abbildung 60).

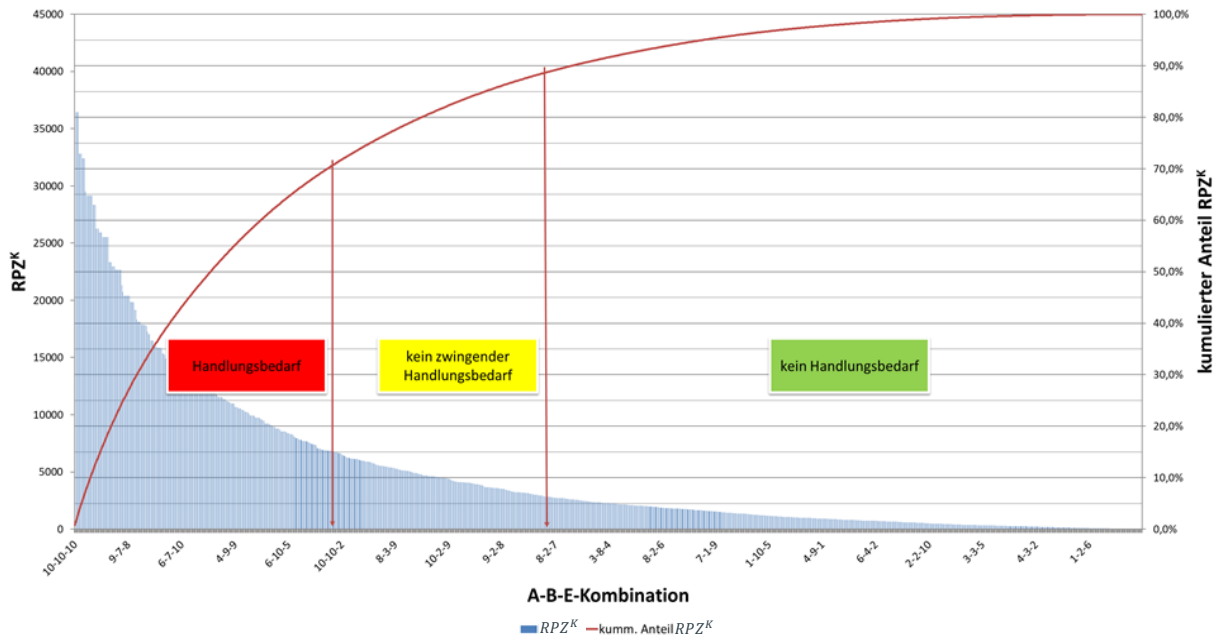


Abbildung 60: Ableitung der Grenzwerte für die Risikoklassen

Auf Basis der definierten Grenzen ist eine Clusterung der 1000 RPZ^K -Wertepaare in die Risikoklassen und eine Ableitung eines Risikokubus möglich. Zur Plausibilisierung ist eine Betrachtung der A/B-Matrizen jedes E-Wertes zielführend. Für $E=10$ sollte sich diese an der VDA-Risikomatrix orientieren, denn diese beschreibt das Risiko ohne Entdeckungsmaßnahmen (vgl. Abbildung 61).

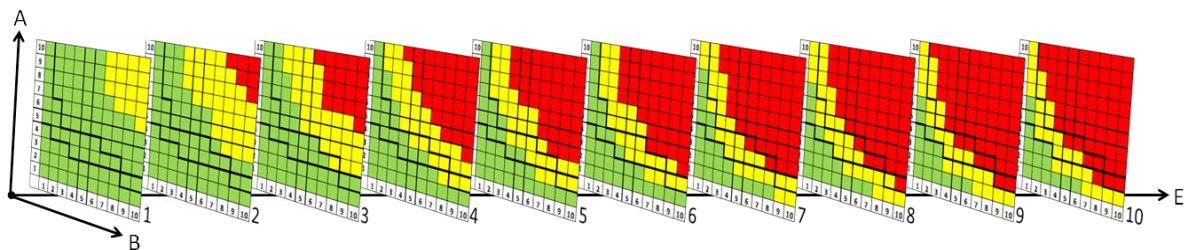


Abbildung 61: Startiteration Risikokubus (A/B-Matrizen)

Als weiteres Kriterium sollte für jede A/B-Kombination gewährleistet sein, dass diese bei steigendem E in der gleichen Risikoklasse verharrt bzw. auch eine schlechte Risikoklasse annimmt. Dieser Grundsatz gilt in den einzelnen Matrizen auch für die A- sowie E-Werte. Resultierend erfordert eine inhaltliche Validierung des Risikokubus eine Betrachtung der Übergänge zwischen den Risikoklassen. Für die Validierung wurden die Bewertungen

bestehender FMEAs mit der Klassifizierung entsprechend dem Risikokubus gegenübergestellt. Datengrundlage dieser Arbeit bilden mehr als 1000 realisierte Prozess-FMEAs. Für die Vergleichbarkeit basieren die FMEAs auf den gleichen Bewertungskatalogen und die Moderatoren verfügen über den gleichen Wissens- bzw. Erfahrungsstand.

Identifizierte Differenzen im Rahmen der Validierung können durch Anpassung der Wichtigkeitsfaktoren bzw. der Grenzen für die Risikoklassen minimiert werden. Für die Ableitung des Risikokubus dieser Arbeit waren mehrere Iterationen bis zur vollständigen Plausibilisierung erforderlich.

9.2 Risikobewertung des Projekts im Anlagenengineering

Abschließend gilt es im Rahmen der Projekt-Risikobewertung die Informationen der Risikoanalyse in einem Bericht zur Entscheidungsfindung zu bündeln (Arbatschat 2016). Der Bericht bildet die Grundlage zur Priorisierung der Risiken sowie ggf. der Maßnahmenableitung. Aus Sicht der Projektsteuerung können nun Fragestellungen wie z.B.:

- Wahrscheinlichkeit der Überschreitung einer Grenze von Projektgesamtkosten,
- Wahrscheinlichkeit der Terminüberschreitung des Anlagenprojektes oder auch
- Zeitpunkt für Maßnahmenrealisierung zur Absicherung eines kritischen Projektumfang bestimmt werden.

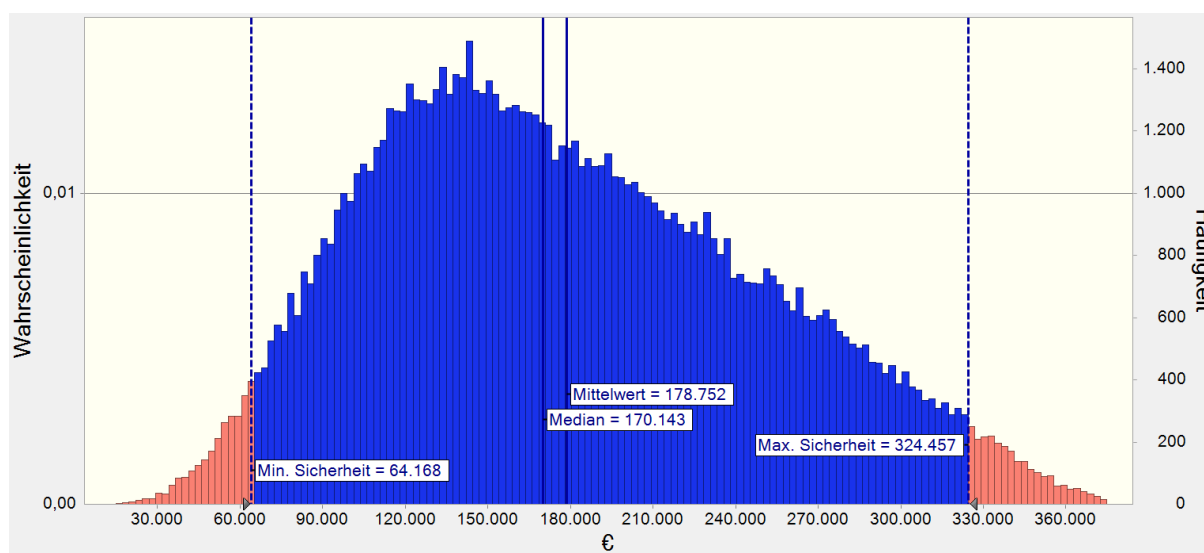


Abbildung 62: Histogramm Projektgesamtrisiko PGR-K

Die Daten der Diagramme sind rein fiktiv und dienen lediglich der Visualisierung. Mithilfe eines Histogramms können Aussagen aus der Risikoanalyse (vgl. Kap. 8.1) bzgl. der globalen Projektgesamtkosten (PGR-K) sowie Terminüberschreitung (PR-Z) getroffen werden. Dieses umfasst das Konfidenzintervall, den arithmetischen Mittelwert und die

Standardabweichung der ermittelten Häufigkeitsverteilung. Für die Histogramme in Abbildung 62 ist exemplarisch ein Konfidenzniveau von 95% gewählt.

Resultierend ergeben sich folgende Aussagen bzgl. der Projektrisiken PGR-K:

- Die Projektmehrkosten werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% im Bereich von 64.168€ - 324.457€ liegen.
- Es sind Projektmehrkosten von 178.752€ zu erwarten (Erwartungswert).

Weiterhin sind Aussagen bzgl. der Einzelrisiken oder auch einzelner Elemente in ihrer Wirkung auf die Gesamtrisikosituation möglich. Hierfür können Tornadodiagramme erstellt werden. In Abbildung 63 sind exemplarisch die Risikokategorien in Bezug auf die kostenbezogenen Projektgesamtrisiken dargestellt.

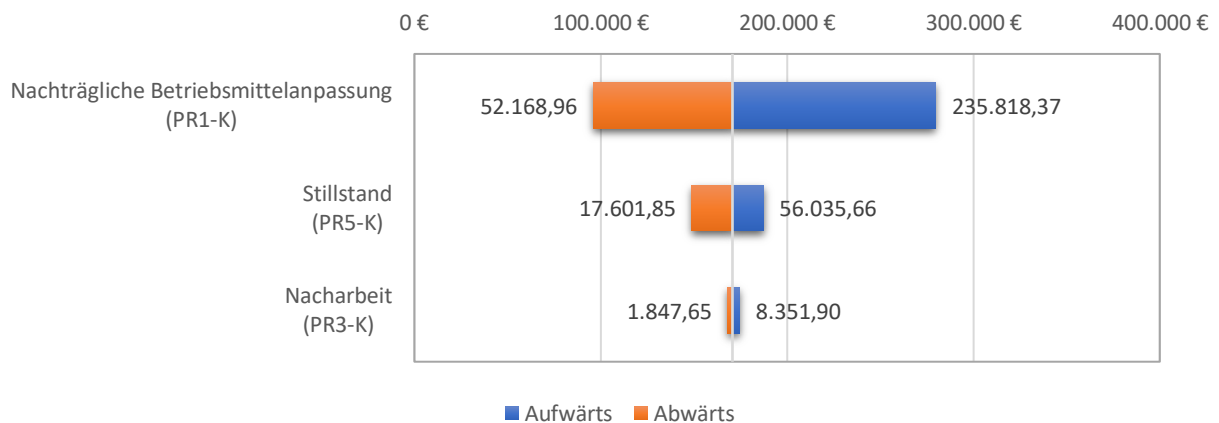


Abbildung 63: Sensitivität Projektgesamtrisiko PGR-K

Für die Visualisierung der dynamischen Umfänge innerhalb eines Ressourcenprojektes bietet sich ein zeitvariantes Vergleichsdiagramm an (vgl. Abbildung 63). Innerhalb des Diagramms kann die Risikoakzeptanzschwelle dargestellt werden. Im Fallbeispiel sind für eine Betriebsmittelkonfiguration $C1_1$ drei alternative Maßnahmen $\sum_{i=1}^3 C2_i$ zu den Zeitpunkten $\sum_{i=1}^3 C3_i$ zur Absicherung vorgesehen. Während zum Zeitpunkt $C3_1$ alle Maßnahmen zur Absicherung geeignet sind, folgt zu einem späteren Zeitpunkt eine Überschreitung der Risikoakzeptanzschwelle.

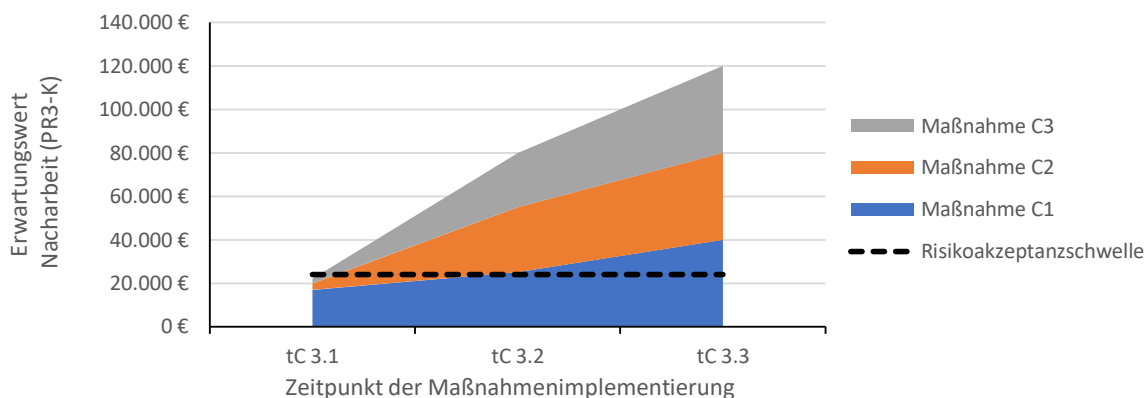


Abbildung 64: PR3-K eines kritischen Projektumfangs

10 Integration der Risikobeurteilung in den Planungsprozess

Nachdem in den vorherigen Kapiteln die Methodik für die Teilprozesse der Risikobeurteilung erläutert wurde (vgl. Kap. 6 bis 9), gilt es, diese in den Planungsprozess zur Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering (vgl. Kap. 2 und 4) zu integrieren. Hierfür wird zunächst die Methodenstruktur erläutert. Anschließend findet eine Prozessanalyse der Teilprozesse zur Risikobeurteilung statt, um die Methoden abschließend in den Mikrozyklus der Risikobeurteilung sowie in den Gesamtplanungsprozess bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen zu integrieren.

10.1 Modellstruktur

Die Methode zur Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen ist analog der Prozesse Risikoidentifikation, -analyse sowie -bewertung in einzelne Module untergliedert. Die isolierte Risikoidentifizierung ermöglicht es, die Erkenntnisse der realisierten Projekte für die Risikoidentifizierung neuer Projekte wiederzuverwenden. Basis der Risikoidentifikation bildet eine Bibliothek, welche die relevanten Einflüsse für die verschiedenen Ressourcenebenen abbildet (vgl. Kap. 7.1, 7.2 und 7.3). Weiterhin enthält die Bibliothek Informationen bzgl. bereits realisierter Anlagenprojekte (vgl. Kap. 7.4) und wird um die aktuellen Anlagenprojekte ergänzt. Neben der Erfassung aller Abweichungen bzgl. der relevanten Einflüsse dienen die Kennzahlen der anschließenden Quantifizierung der Projektrisiken im Rahmen der Risikoanalyse.

Das Modul der Risikoanalyse untergliedert sich in die globale (vgl. 8.1) und lokale (vgl. 8.2) Risikoanalyse für die Bestimmung der monetären und terminlichen Projektrisiken sowie die Analyse der Fertigungsprozesse mittels Funktions- und Fehlerbäumen im Rahmen der FMEA. Die globale Risikoanalyse erfolgt mithilfe einer multivariaten stochastischen Monte-Carlo-Simulation. Sie liefert eine grobe Risikoabschätzung zu Projektbeginn. Hingegen ist es mithilfe der Bayes'sche Netze möglich, die Risiken für einzelne Ressourcenelemente detailliert zu untersuchen. Die Projektumfänge werden hierfür als geschlossenes System mit definierten Elementen und probabilistisch-deterministisch beschriebenen Wirkzusammenhängen modelliert, um Alternativen sowie die zeitabhängigen Ausprägungen des Risikos zu prognostizieren. Abschließend sind die Risiken zu bewerten (vgl. Kap. 9). Zur Bewertung der Fertigungsprozesse kann dies mit einem Risikokubus erfolgen. Die Projektrisiken können hingegen auf Basis der in einem Risikobericht aggregierten Ausgangsdaten der Risikoanalyse abgeleitet werden.

Die Methodenauswahl zur Risikobewertung wird durch die Zielsetzung determiniert. Der Grad der Unsicherheit (vgl. Kap. 5.2) nimmt über den Projektverlauf ab. Folglich bietet es sich zu Projektbeginn an, eine globale Risikoanalyse durchzuführen und diese mit steigender Informationsdichte durch weitere lokale oder auch globale Risikoanalysen zu detaillieren (vgl. Abbildung 65). Auf Basis der Analysen sind über den gesamten Projektverlauf mithilfe des Risikoberichtes Aussagen bzgl. der aktuellen Risikosituation möglich.

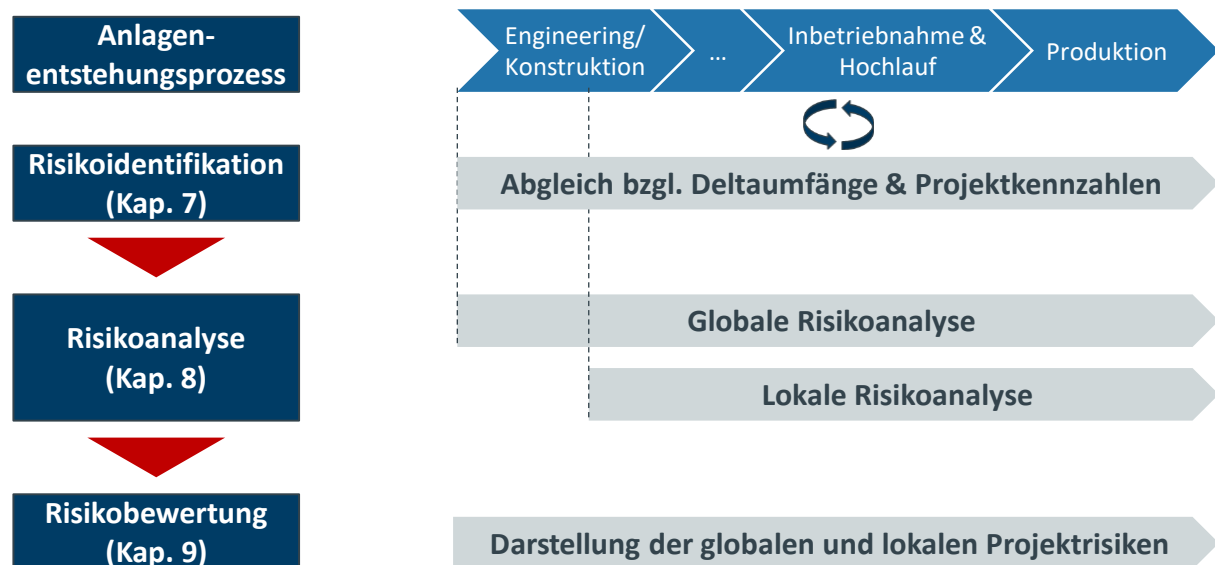


Abbildung 65: Beurteilung der Projektrisiken während der Anlagenentstehung

10.2 Prozessentwurf Risikobeurteilung

Eine Implementierung der erarbeiteten Methoden in den Planungsprozess erfordert eine Prozessmodellierung, anschließende Analyse sowie die abschließende Konzeption des Soll-Prozesses (Allweyer 2005). Im Fokus der Modellierung steht die Tätigkeitsabfolge, weshalb im Folgenden kontrollflussorientierte Methoden Anwendung finden. (Gadatsch 2013) gibt eine Übersicht der Modellierungsmethoden. Bedingt durch die Spezifika hinsichtlich Organisationsaufbau und -ablauf wird von einer detaillierten Prozessbeschreibung abgesehen. In diesem Zusammenhang findet im Folgenden das Prozessmapping mittels Flussdiagramm in Schwimmbahnen statt. Die Erläuterung des Prozessmappings erfolgt exemplarisch für die Methode Delta-Engineering-Umwelt.

Vorab kann ein einheitliches Prozessverständnis mit der SIPOC-Analyse (LIPOK) als Methode zur Prozessoptimierung des Six-Sigma-Managementsystems geschaffen werden (Krallmann et al. 2013) (Dräger und Rößler 2011). SIPOC ist das Akronym für Supplier, Input, Process, Output sowie Customer. Die Methode findet im Rahmen des Lean Managements während der „Define-Phase“ Anwendung und visualisiert die Einflüsse sowie die Schnittstellen auf Prozesse (Allweyer 2005). Die SIPOC-Analyse ermöglicht eine grobe

Detailierung des Ablaufs hinsichtlich des Inputs der Lieferanten für die Realisierung eines Prozesses für einen definierten Output des Kunden (Dräger und Rößler 2011) (Crezelius 2015) (vgl. Abbildung 66). Innerhalb des Diagramms gibt die Nummerierung des Inputs Aufschluss über die Lieferanten. Beispielsweise werden die Erfahrungen bzgl. vorangegangener Probleme durch den Betreiber sowie den Anlagenplaner gemeldet. Anschließend erfolgt auf Grundlage des Inputs die Realisierung der Teilprozesse, die wiederum Output für die Kunden erzeugen. Die Verknüpfung von Output und Kunden erfolgt ebenso über eine numerische Zuordnung. Bei Bedarf können die Anforderungen an den Input sowie Output näher spezifiziert werden.

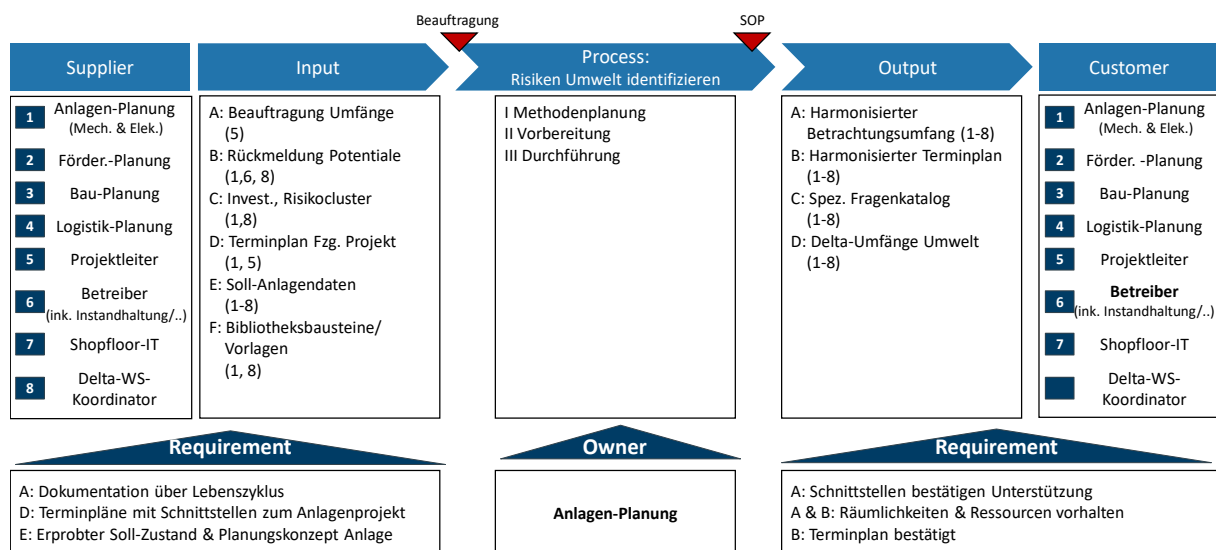


Abbildung 66: SIPOC-Analyse Delta-Engineering-Umwelt (Crezelius 2015)

Zur nachhaltigen Implementierung in den Planungsprozess mit einem definierten Rollenverständnis ist die Erstellung eines Flussdiagramms essenziell (Reiss und Reiss 2014) (DIN EN ISO 9001). Dieses reduziert u.a. Missverständnisse und verbessert die Kommunikation. Es bestehen verschiedenste Standards bzgl. der Notation von Flussdiagrammen, die kontextspezifisch Anwendung finden (Schwaiger 2008) (ISO 5807). Im Folgenden wird eine RASCI-Matrix verwendet, die vielfach für die Erlangung der ISO-Zertifizierung herangezogen wird (Reiss und Reiss 2014) (DIN EN ISO 9001). Das Rollenverständnis wird teilweise auch als RACI, RASCI oder DEMI bezeichnet. Das Akronym RASCI leitet sich aus folgenden Rollen ab (Schwaiger 2008):

- **R**esponsible (verantwortlich),
- **A**pproval bzw. **A**ccountable (genehmigend bzw. rechenschaftspflichtig),
- **S**upport (unterstützend),
- **C**onsulted (beratend) und
- **I**nformed (informiert).

Abbildung 67 visualisiert exemplarisch die Zuordnung der Verantwortlichkeiten für die Durchführung des Workshops Delta-Engineering-Umwelt. Der Teilprozess „Durchführung des Workshops“ erfolgt nach der Methodenplanung und Vorbereitung. Während der Methodenplanung erfolgt u.a. die Ableitung des spezifischen Fragenkatalogs durch die Verknüpfung der Einflussgrößen der Montageprozessbausteine mit den zu realisierenden Ressourcenelementen (vgl. Kap. 7.2). Weiterhin gilt es, die Informationen vorangegangener Produktlebenszyklen der Anlagenelemente im Sinne des Lessons Learned zu spezifizieren. Während der anschließenden Verbreitung des Workshops sind die organisatorischen Rahmenbedingungen, wie z.B. die Definition des Teams oder auch die Planung der Räumlichkeiten sowie des Ablaufs, abzustimmen. Auf Grundlage dieser Informationen beginnt der Prozessschritt zur Durchführung des Workshops. Die Methodenverantwortung obliegt dem Methodenexperten.

Prozess	Teilprozess	Anlagen-Planung	Förder-Planung	Bau-Planung	Logistik-Planung	Projekt-leiter	Be-treiber	Shopfloor-IT	Delta-WS-Koordinator	Ergebnis	Dauer
III. Durchführung	A: Checkliste Phase Durchführung sichten								R	Checkliste gesichtet	1 Tag
	B: Durchführung Delta-WS-Umwelt (fachlich)	R	S	S	S	C	S	S	C	Planungskonzept (Soll- und Ist-Stand) vorstellen	
	C: Durchführung Delta-WS-Umwelt (methodisch)		S	S	S		S	S	R	Abweichungen in Bibliothek dokumentieren	
	D: Folgen Soll-Ist Abweichungen abschätzen	R	S	S	S	I	S	S	S	Grobbewertung Soll-Ist-Abweichungen	

R Responsible
 I Informed
 S Support
 C Consulted

Abbildung 67: Flussdiagramm mit RASCI Systematik Delta-Engineering-Umwelt

Dieser sichtet eingangs die Checkliste, die alle Aktivitäten des Teilprozesses umfasst, führt anschließend durch den Workshop und dokumentiert die Erkenntnisse. Hingegen sind für die fachliche Durchführung des Workshops die Anlagenplaner, welche die Schnittstellen und Anforderungen bzgl. des Anlageneinsatzes mit den späteren Anlagenbetreibern sowie Lieferanten abstimmen müssen, verantwortlich. Output des Workshops sind die Soll-Ist-Abweichungen, welche als Grundlage für die weitere Risikoanalyse sowie Risikobewertung dienen. Diese können als Zusammenfassung am Ende des Workshops ausgegeben werden.

10.3 Mikrozyklus Risikomanagement bei der Wiederverwendung

Vor der Methodenintegration in den spezifischen Projektablauf eines Volumenherstellers in der Automobilindustrie erfolgt eine generische Darstellung des Mikrozyklus des Risikomanagements für die Wiederverwendung von Entwurfselementen. Folglich ist keine zeitliche Zuordnung der Produkt- und Prozessgestaltung im Projekt hinterlegt (vgl. Abbildung 68).

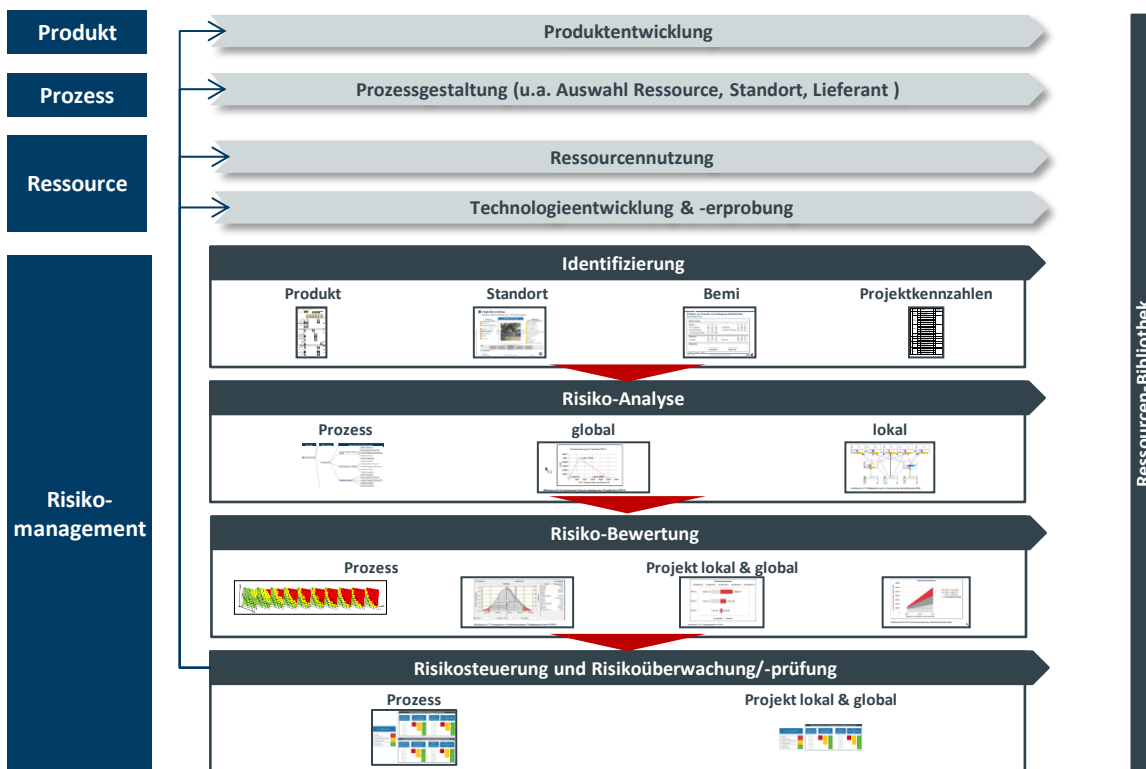


Abbildung 68: Mikrozyklus Risikomanagement (i.e.S.)

Die erarbeiteten Methoden der Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering bauen sukzessiv aufeinander auf. Basis jedes Mikrozyklus bilden eine Bibliothek mit Montageprozessbausteinen (vgl. Kap. 7.1) sowie eine Datenbank mit Projektkennzahlen bereits realisierter Projekte (vgl. Kap. 7.4). Eingangs bedarf es in Abhängigkeit von der späteren Bewertungsmethode der Risikoidentifizierung einer Delta-Betrachtung hinsichtlich der Umwelt (vgl. Kap. 7.2), des Produkts (vgl. Kap. 7.3) und der Ressource sowie der Erfassung der Projektkennzahlen (vgl. 7.4) für die spätere Bewertung. Diese Daten werden anschließend mit dem Fokus auf die Projekt- oder die Prozessrisiken analysiert. Während für die Prozessanalyse die FMEA-Methodik genutzt wird, finden bei der globalen Risikoanalyse des Projektes die Monte-Carlo-Simulation mit dem „Relative Risk Weighting-Verfahren“ (vgl. Kap. 8.1) und bei der lokalen Risikoanalyse die Bayes'schen Netze Anwendung (vgl. Kap. 8.2).

Im Rahmen der Risikobewertung des Prozesses kommt der Risikokubus (vgl. Kap. 9.1) zur Anwendung. Die globalen Projektrisiken können in Histogrammen sowie Tornadodiagrammen bewertet werden. Für die dynamische Abbildung der Projektrisiken eignet sich ein zeitvariantes Vergleichsdiagramm (vgl. Kap. 9.2).

Mit den Erkenntnissen der Risikobewertung sind ggf. gezielte Maßnahmen zur Risikoreduzierung zu definieren und anschließend zu realisieren. Im Anschluss an die Beurteilung

der Risiken sind ggf. entsprechende Maßnahmen zu definieren. Analog der Dokumentation des Projektfortschritts ist auch das Risiko in Bezug auf die Realisierung sowie die Wirksamkeit der definierten Maßnahmen zu dokumentieren. Die Differenzen bei der Dokumentation hinsichtlich Prozess- sowie Projektrisiken begründen sich in der quantitativen bzw. qualitativen Datenausprägung. Für das Risikotracking in Bezug auf die Maßnahmenumsetzung von Prozessrisiken bietet sich eine Untergliederung in präventive und prüfende sowie in geplante sowie realisierte Maßnahmen an. Dies ermöglicht eine Differenzierung zwischen ursprünglicher, aktueller sowie geplanter Risikosituation über den Projektverlauf. Als kritisch sind aus Projektsteuerungssicht die Maßnahmen mit Terminüberschreitung sowie die Risiken der Kategorie drei, die trotz Realisierung aller Maßnahmen bestehen bleiben, zu beurteilen (vgl. Abbildung 69). Die Dokumentation der Projektrisiken erfordert gleichermaßen die Dokumentation der Risikopositionen hinsichtlich des Umsetzungsstands der definierten Maßnahmen. Von einer Differenzierung hinsichtlich vorbeugender sowie prüfender Maßnahmen wird abgesehen. Resultierend ergibt sich ein Risikobericht in Abhängigkeit des Detaillierungsgrads der Bewertung für die verschiedenen Projektrisiken.

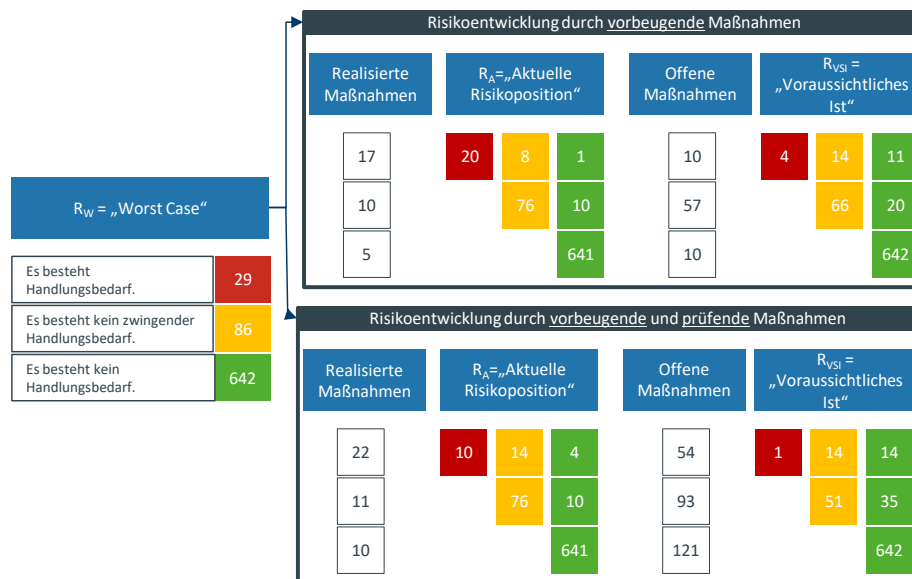


Abbildung 69: Exemplarischer Risikobericht eines Fertigungsprozesses

Die Reduzierung der Risiken gilt erst mit dem Wirksamkeitsnachweis im Rahmen der Maßnahmenumsetzung als erbracht. Identifizierte Soll-Ist-Abweichungen bzgl. der Risikoposition, die während der Risikoüberwachung identifiziert werden, induzieren ggf. eine erneute Risikobeurteilung oder eine Modifikation der Ressourcen-Bibliothek bzw. des Mikrozyklus.

Die gewonnenen Erkenntnisse innerhalb eines Mikrozyklus fließen in die Bibliothek für die Montageprozessbausteine sowie die Projektkennzahlen zurück. Einhergehend mit

dem steigenden Durchlauf der Mikrozyklen erhöht sich die Informationsdichte und -qualität der Daten innerhalb der Ressourcen-Bibliothek.

10.4 Makrozyklus Risikomanagement bei der Wiederverwendung

Die Integration der entwickelten Methoden zur Risikobeurteilung für das Risikomanagement bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen orientiert sich sowohl am Anlagenengineering-Prozess in Bezug auf die Massenfertigung der Automobilindustrie (vgl. Kap. 2) als auch am Mikrozyklus des Risikomanagements (vgl. Kap. 10.3). In Abhängigkeit von der betrachteten Ressourcen-Ebene kann der Prozess variieren. Der im Folgenden beschriebene Prozess orientiert sich an der Ebene Arbeitseinheit.

Der Makrozyklus untergliedert sich in einen projektabhängigen sowie -unabhängigen Teil (vgl. Abbildung 70). Projektunabhängig erfolgt die Gestaltung der Ressourcen-Bibliothek durch die Entwicklung neuer Ressourcen, neuer Montageprozessbausteine sowie durch die Informationen aus anderen Projekten. Die folgende Prozesscharakterisierung erfolgt unter der Annahme, dass die Ressourcen-Bibliothek bereits gefüllt ist.

Zu Projektbeginn sind die erforderlichen Fertigungsprozesse für die definierten Produktmerkmale zu spezifizieren. Zur Abbildung des Prozesses werden die Montageprozessbausteine (vgl. Kap. 7.1) zusammengefügt. Modifikationen des Konzeptes, beispielsweise hinsichtlich Ablauf sowie Mechanisierungsgrad, werden durch die verschiedenen Montageprozessbausteine abgebildet. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit, flexibel auf die Änderung externer Einflüsse zu reagieren. Die Prozessmodellierung induziert den ersten Mikrozyklus bzgl. des Risikomanagements. Basis der Risikoidentifikation bildet das Delta-Engineering-Produkt (vgl. Kap. 7.3). Auf Basis des ersten Produktkonzeptes ist so eine grobe Risikobeurteilung möglich, die ggf. eine Anpassung der Ressource oder auch des Produkts erfordert.

In der nächsten Detaillierung erfolgt mit der Definition des Anlagenstandorts der nächste Mikrozyklus mit dem Fokus Umwelt (vgl. Kap. 7.2). Dies kann eine Anpassung des Standorts sowie der Ressourcen nach sich ziehen. Der Abgleich und die anschließende Bewertung der relevanten Einflüsse sind möglichst umfassend vor der Lastenhefterstellung abzuschließen. Für die Erfassung von Einflussänderungen im Projektverlauf nach deren Aufnahme ist ein geregelter Informationsfluss zwischen Anlagenbetreiber und der Projektleitung für die Ressource sicherzustellen. Eine Möglichkeit hierfür bildet die lebenszyklusbegleitende konsistente Abbildung der eingesetzten Ressource (Biffel et al.

2017) (Hell 2018) (Schmidt 2018). Ist dies nicht gegeben, muss ggf. eine erneute Beurteilung im fortlaufenden Projekt erfolgen.

Mit der Lastenhefterstellung und Beschaffung der Ressource erfolgt ein erneuter Mikrozyklus mit dem Fokus auf die Ressourcen-Elemente. Zur Realisierung einer akzeptablen Risikoposition kann dies eine Anpassung der Ressourcen, der Umwelt sowie des Produkts bedingen. Die Informationen bzgl. der Risiken der Ressourcen für die Projektrealisierung und den Prozess beim Auftraggeber sind für die Gestaltung der Prozesse beim Anlagenlieferanten zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang starten neue Mikrozyklen beim Anlagenlieferanten und dessen Sub-Lieferanten.

Die Mikrozyklen des Risikomanagements gestalten sich rollierend über den Produktentstehungsprozess. Neben der Anpassung von Ressource, Umwelt und Produkt sind auch weitere Maßnahmen, wie z.B. zusätzliche Tests beim Anlagenlieferanten zur Absicherung neuer Umfänge, möglich. Mit zunehmender Detaillierung ist eine genauere Bestimmung der Risikoposition möglich. Folglich gestalten sich die Mikrozyklen für die einzelnen Risikopositionen hinsichtlich Produkt, Umwelt sowie Ressource iterativ.

Exemplarisch sind das Produktkonzept sowie die Detaillierung des Konzepts nach der Auslegung hinsichtlich der Risikoeinflussfaktoren auf die Ressource zu bewerten. Im Sinne des Frontloading sind die Einflüsse, die Risiken induzieren, den Stakeholdern vor der Detaillierung ihrer Einflussfaktoren zu übermitteln, um eine Fehlervermeidung durch eine frühe Beurteilung der Risiken anzustreben, da die Einflussmöglichkeiten über den Projektverlauf abnehmen (vgl. Abbildung 52). Die Prozessrisiken werden analog kontinuierlich über den Produktentstehungsprozess beurteilt. Die Beurteilung erfolgt auf Basis des Informationsstands zum Bewertungszeitpunkt. Eine erste Bewertung kann auf Basis eines Grobkonzeptes für den Prozess erfolgen.

Die bewerteten Risiken zzgl. der definierten Maßnahmen werden über den gesamten Produktentstehungsprozess kontinuierlich in einem Risikoregister getrackt. Während das Register zu Projektbeginn beispielsweise lediglich eine globale grobe Abschätzung der Risikoposition enthält, nimmt die Präzisierung der Risiken mit der steigenden Granularität im Projektverlauf zu.

Die Erkenntnisse sind in der Ressourcen- bzw. Kennzahlendatenbank zu hinterlegen. Resultierend können die Erkenntnisse bzgl. der Risikobewertung auch für Folgeprojekte genutzt werden. Weiterhin können die Erkenntnisse hinsichtlich der Art und Ausprägung der Abweichungen bzgl. der Produkte, Prozesse sowie Ressource für eine Optimierung

der verwendeten Ressourcen innerhalb der Ressourcen-Bibliothek genutzt werden. Aus der Kausalität der Häufigkeit sowie den resultierenden Folgen der Abweichungen leitet sich weiterhin eine Priorisierung der Optimierungsmaßnahmen ab.

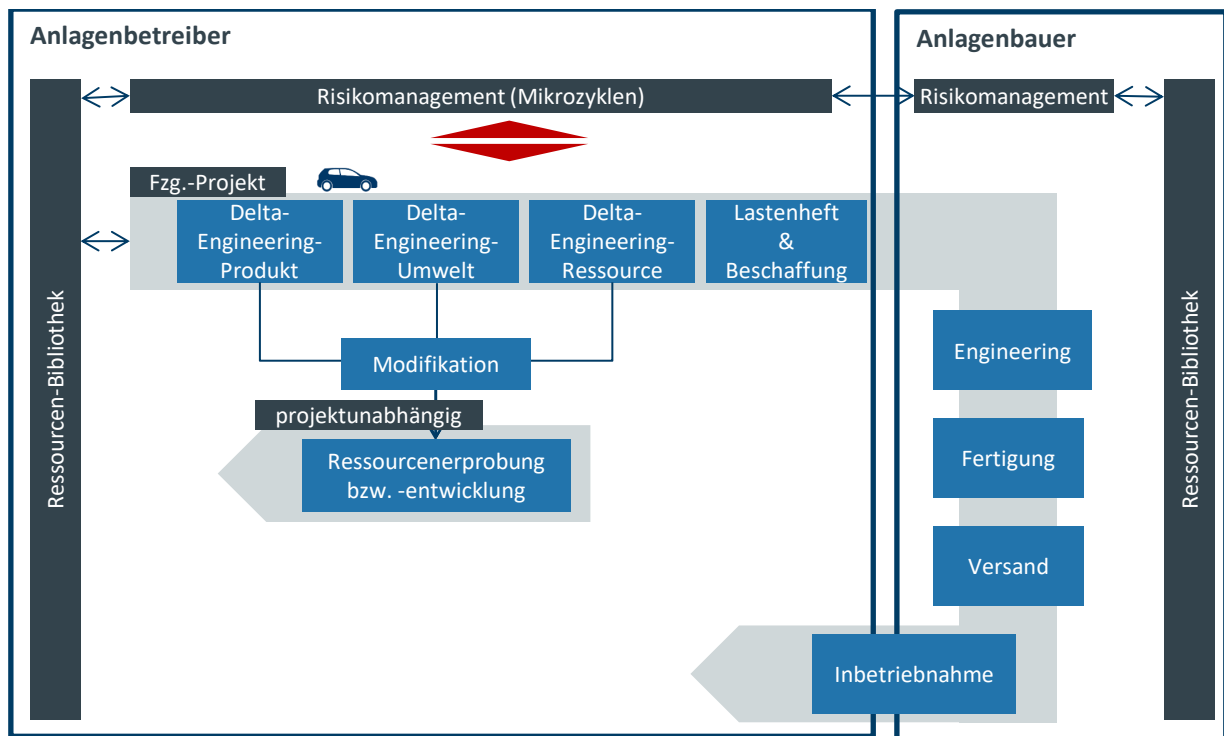


Abbildung 70: Makrozyklus Risikomanagement

11 Methodenanwendung in der Montageplanung

Die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Methoden zur Risikobeurteilung gilt es, bzgl. ihrer Eignung in der Praxis bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen zu erproben. Im Fokus steht der Nachweis zur Reduzierung des Handlungsbedarfs bzgl. der Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen aus Kapitel 5. Ein Abgleich der durch die Methodenanwendung identifizierten und bewerteten Risiken mit den während des Projekts realisierten Abweichungen ist nicht zielführend, da der durch die Methoden ausgewiesene Handlungsbedarf i.d.R. präventive Maßnahmen induziert.

Die erarbeiteten Methoden zur Risikobeurteilung wurden für verschiedenste Anwendungen in der Montage, u.a. Manipulatoren wie z.B. zum Einbau von Cockpit-, Frontend, Türen, geschraubter Dachsysteme oder bei automatisierten Anlagen wie beispielsweise dem Fahrwerks- oder Scheibeneinbau in verschiedenen Fahrzeugprojekten und Standorten, erfolgreich erprobt. Für die Darstellung der Validierung wird das Fallbeispiel „Einbau von geklebten Dachsystemen“ ausgewählt und erläutert, da dieses sowohl automatisierte als auch hybride Montageprozesse umfasst. Die Ausprägungen der Daten dienen der Veranschaulichung und sind aus Vertraulichkeitsgründen fiktiv. Darüber hinaus bedingt die Intention dieses Kapitels keine repräsentative Datengrundlage. Die Erprobung des Konzepts orientiert sich am Planungsprozess (vgl. Kap. 10). Dies erfordert zum Start der Beurteilung eine Abbildung des Dachsystemverbau mithilfe der Montageprozessbausteine. Anschließend erfolgt die Risikoidentifizierung (vgl. Kap. 7). Mit der Analyse bzgl. Projekt- sowie Prozessrisiken (vgl. Kap. 8) und der anschließenden Risikobewertung (vgl. Kap. 9) endet dieses Kapitel.

11.1 Fallbeispiel Dachsystem-Verbau

Analog dem PPR-Modell (vgl. Kap. 2.1) werden vor der Methodenanwendung das Produkt, der Montageprozess sowie die Funktionsweise des Entwurfselements „Dachsystem-Verbau“ charakterisiert. Die Betrachtung des Fallbeispiels, am Dachsystem-Verbau, findet auf der Ebene Arbeitseinheit statt (vgl. Abbildung 33). Die Einbauvorrichtung ist standardisiert und findet in verschiedenen Fahrzeugprojekten Anwendung. Das Fallbeispiel erfordert die Beurteilung der Prozess- sowie Projektrisiken für ein neues Fahrzeugprojekt durch die Realisierung dieser standardisierten Anwendung.

Produkteigenschaften

In Abhängigkeit vom Hersteller sowie vom Fahrzeug werden verschiedene Dachsysteme, die sich u.a. bzgl. der Befestigungskonzepte sowie des Funktionsumfangs differenzieren, in der Endmontage verbaut. Im Folgenden wird exemplarisch ein geklebtes Dachsystem betrachtet. Bedingt durch die Abhängigkeit von Fahrzeugmodell bzgl. der Produktstruktur und der -eigenschaften werden die Geometrieausprägungen nicht weiter spezifiziert.

Ein glasfaserverstärktes Polyurethansystem oder Thermoplast bildet den Rahmen des Dachsystems. Weiterhin beinhaltet das Modul einen beweglichen Glasdeckel, einen Stellmotor für die Deckel, ein Rollo sowie einen Klemmrahmen. Das Dachsystem schließt mit einer Gummidichtung ab und ist sowohl vorn als auch seitlich durch eine Blende eingefasst.

Für die Positionierung des Dachsystems befindet sich im hinteren Rahmen ein Referenzpunkt-System-(RPS)-Dorn, der während des Montageprozesses in das RPS-Loch im Dachausschnitt der Karosserie gefügt wird. Im Vorfeld wird das Dachsystem mit einer umlaufenden Polyurethan-Klebstoffraupe bestückt. Das Dachsystem wird von oben auf den Dachflansch mit einer umlaufenden Toleranz von bspw. $\pm 2 \text{ mm}$ gefügt.

Montageprozess

Die Montageprozesse geklebter Dachsysteme sind bzgl. ihres Mechanisierungsgrads zu klassifizieren, welches u.a. von der Fertigungsform, der Taktzeit, den Einbauraten sowie den Fertigungspersonalkosten abhängig ist. Die Ablauffolgen des Einbaus von Dachsystemen decken sich jedoch (vgl. Abbildung 71).

Im ersten Teilprozess wird der Dachflansch von Verunreinigungen, wie z.B. Staub und Fingerabdrücken, für eine möglichst optimale Haftung des Klebstoffs an der Karosserie gereinigt. Bedingt durch den i.d.R. manuellen Charakter des Prozessschrittes wird dieser im Folgenden nicht betrachtet. Anschließend wird das Dach mithilfe eines Manipulators oder durch einen Roboter aus einem Behälter entnommen und mittels eines Zentrierschusses definiert positioniert. Aus dieser definierten Position starten die Aufnahme des Daches und der Auftrag der umlaufenden Kleberaupe, der bedingt durch die Prozess-toleranzen i.d.R. durch einen Roboter ausgeführt wird. Nach der Klebstoffapplikation kann der Einbau des Dachsystems sowohl mechanisiert durch einen Mitarbeiter mittels Manipulator als auch vollautomatisch erfolgen. Für den Verbau im Fließbetrieb ist eine Synchronisation der Einbauvorrichtung mit der Fördergeschwindigkeit der Karosseriefördertechnik erforderlich. Sobald ein Fahrzeug in den Takt eingefördert wird, beginnt die

Positionierung des Dachsystems zur Karosserie. Hierfür muss das Dachsystem im Fahrzeug im hinteren Bereich mittels RPS-System und im Frontscheibenausschnitt durch eine y-Vermittlung vorpositioniert werden. Der Fügevorgang in z erfolgt durch das Anpressen mit einer definierten Kraft.

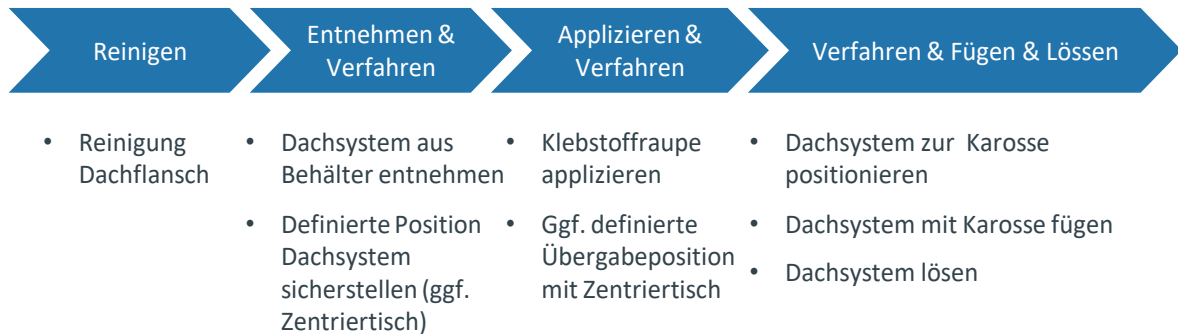


Abbildung 71: Montageprozess geklebter Dachsysteme

Die Ressource, welche Wiederverwendung in weiteren Fahrzeugprojekten finden soll, beinhaltet eine automatisierte Entnahme sowie einen automatisierten Klebstoffauftrag durch einen Manipulator. Die Entnahme der Dachsysteme erfolgt mithilfe eines Portalroboters aus einem Behälterbahnhof auf den Zentriertisch. Für den Klebstoffauftrag dienen ein stationärer Klebeturm sowie ein Roboter, der das Dachsystem unter der Klebedüse des Klebeturms hindurchführt und dieses abschließend auf einem Zentriertisch ablegt. Der Fügevorgang erfolgt durch einen Manipulator mit einem Zweirahmensystem. Der äußere Rahmen dient der Vorpositionierung sowie Fixierung an der Karosserie. Hingegen drückt der innere Rahmen das Dachsystem an das Fahrzeug an.

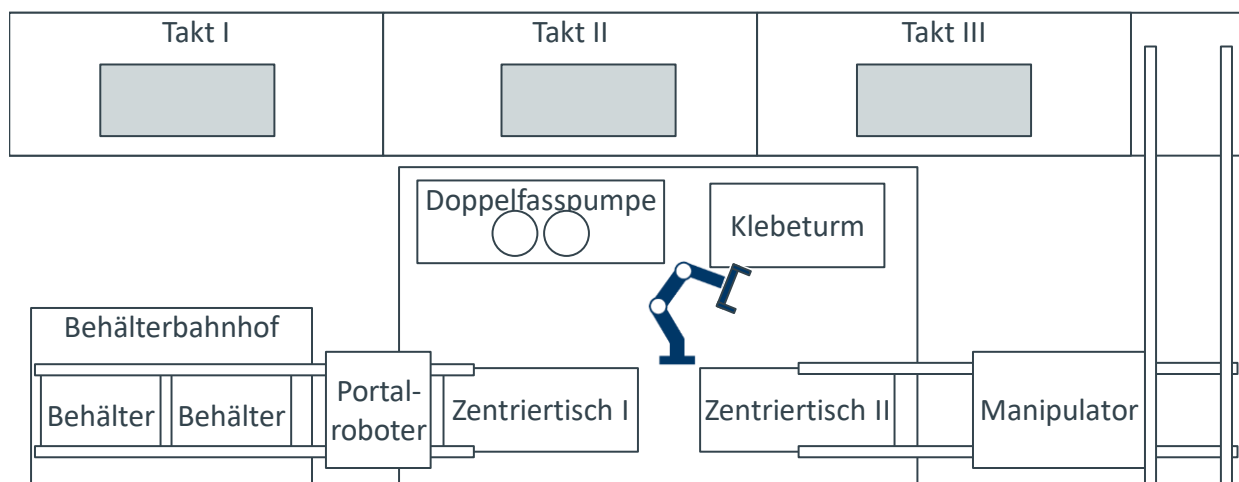


Abbildung 72: Ressource geklebtes Dachsystem

Eine Aufgliederung der Elemente der Ressource zum Dachsystemverbau zuzüglich der Funktionsuntergliederung (vgl. Kap. 6) findet sich in Anhang A wieder.

Projektprämissen des Fallbeispiels

Im Folgenden sind die Risiken für die Realisierung der zuvor charakterisierten Ressource „Einbauvorrichtung Dachsystem“ zu beurteilen. Neben der Anlagentechnik gilt es, neue Behälter (50 Stk.) zu beschaffen. Für die Realisierung des Gesamtprojektes sind exemplarisch 850.000 € Plankosten veranschlagt. Die weiteren globalen Projektkennzahlen A_i sind dem Anhang zu entnehmen. Für das Fallbeispiel sind folgende Projektrisiken zu beurteilen:

- Nachträgliche Anlagenmittelanpassung (PR1-K),
- Nacharbeit (PR3-K) und
- Stillstand (PR5-K).

Die globalen Risikokennzahlen B_i (vgl. Anhang D) basieren auf der Risikoidentifikation hinsichtlich Produkt und Standort (vgl. Kap. 7) sowie folgenden Annahmen.

Ressource: Die Struktur und Eigenschaften der Elemente der zu beurteilenden Ressource sind identisch zur erprobten Ressource. Folglich ist der Modifikationsumfang gering.

Lieferant: Der Anlagenlieferant realisierte mehrere Anlagen für Dachsysteme erfolgreich. Kundenkenntnisse liegen aus einer Vielzahl realisierter Projekte vor.

Ausfall/Notstrategie: Nicht für den Ausfall aller Anlagenelemente existiert eine Notstrategie. Exemplarisch können die Entnahme der Dachsysteme sowie der Ausfall der Klebestation nicht vollständig kompensiert werden.

Weiterhin ergeben sich im Projektverlauf zwei kritische Projektumfänge. Auf Basis der Annahmen werden für die Behälter und Stellantriebe die lokalen Risikokennzahlen C_i (vgl. Anhang C) abgeleitet.

Behälter: Aus Abweichungen der Toleranzvorgaben während der Behälter-Fertigung, können Probleme bei der Dachentnahme resultieren. Eine manuelle Entnahme führt zu einer Überschreitung der Taktzeit und einer potentiellen Produktbeschädigung. Zur Prüfung der Behältermaße sind eine 100%-Kontrolle oder eine Stichprobenkontrolle möglich.

Stellantrieb: Für die Realisierung des Stellantriebs des Einbaumanipulators stehen sowohl elektrische als auch pneumatische Varianten zur Auswahl. Während der Funktionsnachweis pneumatischer Stellantriebe durch den langjährigen Serieneinsatz vorliegt, befinden sich elektrische Stellantriebe noch nicht im Serieneinsatz.

11.2 Risikoidentifikation

Für das im Vorherigen charakterisierte Entwurfselement gilt es im Folgenden die Methoden zur Risikoidentifizierung (vgl. Kap. 7) anzuwenden. Den Anfang bildet die Untergliederung der Montageprozessbausteine. Anschließend wird das Delta-Engineering für das Produkt, den Standort und die Ressource durchgeführt.

11.2.1 Bibliothekgestützte Risikoidentifizierung

Für die Abbildung des Gesamtprozesses (vgl. Abbildung 72) wird dieser untergliedert, bis die Teilprozesse eindeutig einzelnen Montageprozessbausteinen zuzuordnen sind (vgl. Kap. 7.1). Diese Teilprozesse werden durch Ressourcen realisiert (Kutzbora 2015).

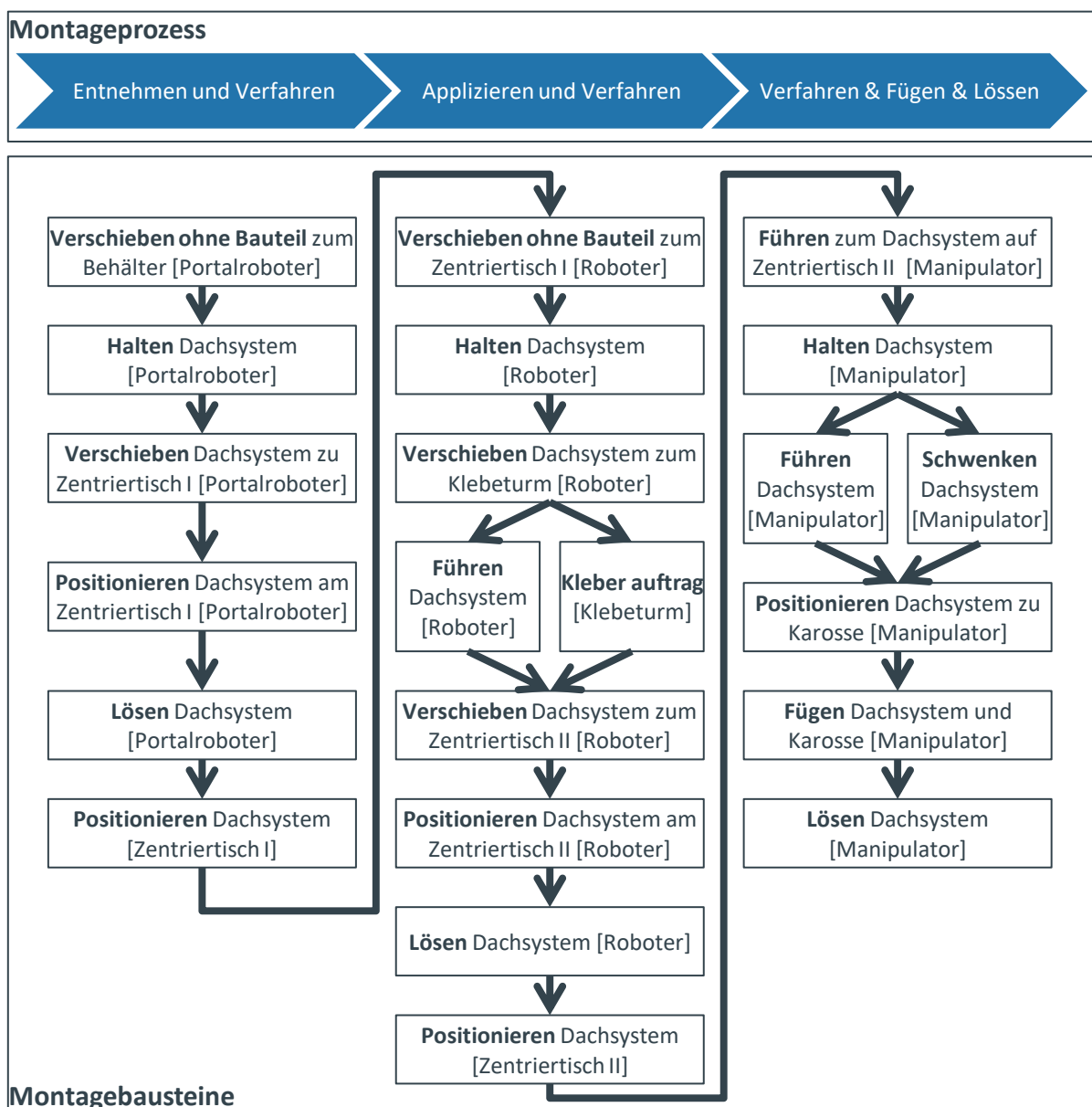


Abbildung 73: Bibliothekgestützte Montageprozess-Modellierung

Die mechanisierten Umfänge der Ressource umfassen die Montageprozessbausteine „Halten“, „Verschieben mit Bauteil“, „Fügen“ und/oder „Positionieren“, „Lösen“ und „Verschieben ohne Bauteil“. Aus dem Ablauf sowie dem Mechanisierungsgrad der Montageprozessbausteine ergibt sich der Gesamtprozess. Den Teilprozessen sind anschließend die potentiellen Funktionen, Fehlfunktionen sowie die Einflussgrößen zugeordnet (vgl. Abbildung 74). Dies bildet die Ausgangsbasis der anschließenden Risikoidentifizierung bzgl. Produkt und Umwelt.

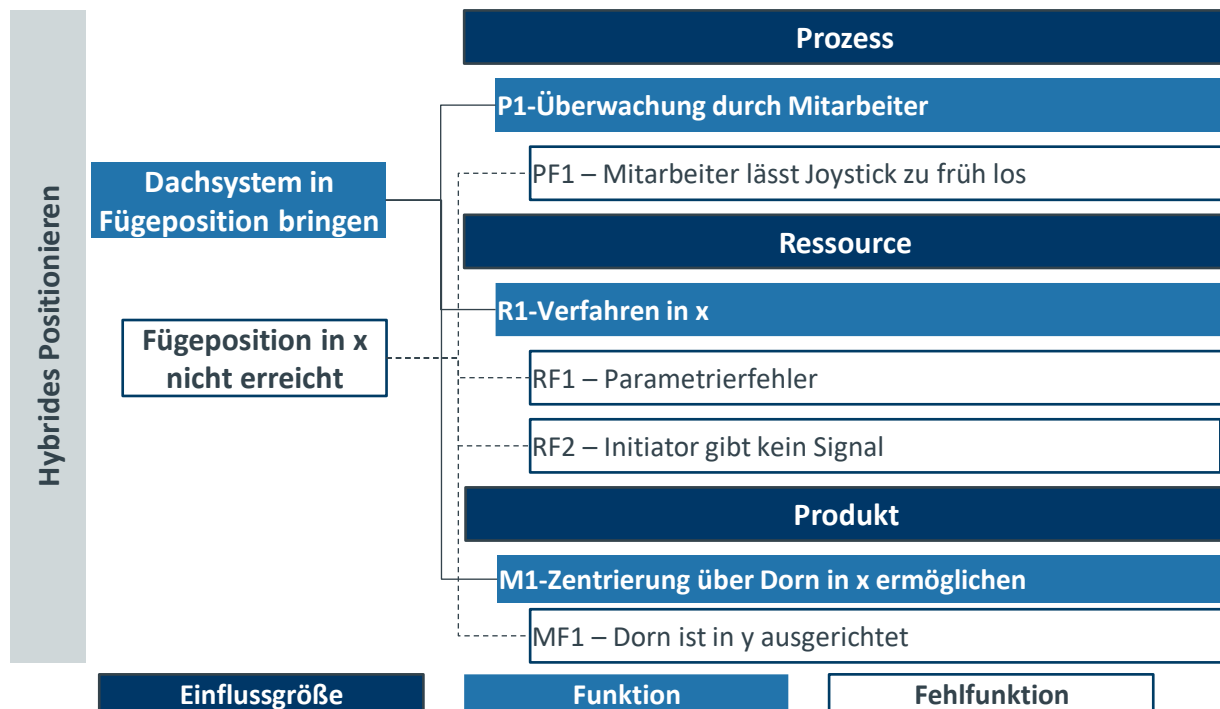


Abbildung 74: Funktions- und Fehlfunktionsverknüpfung der Montageprozessbausteine

11.2.2 Delta Engineering Produkt

Die identifizierten Einflüsse der bibliothekgestützten Montageprozess-Modellierung sind durch ein interdisziplinäres Team (vgl. Kap. 7.3) zu bewerten und ggf. zu ergänzen. Aus der Funktions- sowie Fehlfunktionsstruktur leitet sich eine systematische Risikoidentifizierung ab. Im Rahmen der Analyse ergibt sich die in (vgl. Abbildung 75) dargestellte Checkliste mit den relevanten Produkteigenschaften. Während sich die Ausprägung der Soll-Eigenschaften aus bereits realisierten Projekten ergibt, leiten sich die Ist-Eigenschaften des Produkts aus dem aktuellen Projektstand ab. In diesem Zusammenhang wird es möglich, die relevanten Produkteigenschaften bzgl. der zu realisierenden Ressource mit denen bereits realisierter Ressourcen abzugleichen (Strathmann 2016).

		Montagefunktionen							
		Halten (Greifen/ Auf- nehmen)	Entriegeln	Verschieben/ Handhaben	Positionieren/ Zentrieren	Applizieren	Messen	Fügen	
Geometrie Bauteil Freiraumprofil									Kommentar
Bauteilgeometrie	Art Freiraumprofil	Strak Geometrie				minimaler Freigang Klebstoffraupe zu Bauteil [mm]		Strak Geometrie	
	Vorgabe	Vorgänger					1	Vorgänger	
	IST-Wert	Nein				2,09		Nein	
	Risiko	Kritisch				Unkritisch		Kritisch	
Anlieferung	Art Freiraumprofil	Behälterabmaße (L x B x H) [mm]							
	Vorgabe	1500 x 1200 x 1481							
	IST-Wert	1500 x 1200 x 1481							
	Risiko	Unkritisch							
Gewicht Bauteile									Kommentar
Gewicht PASD	Art Freiraumprofil		maximales Bauteilgewicht [kg]						
	Vorgabe		35						
	IST-Wert		23,5						
	Risiko		Unkritisch						
Konzept Positionieren									Kommentar
RPS-Dorn mittig im hinteren Bereich bei Y = 15	Art Freiraumprofil			Durchmesser RPS-Dorn [mm]					
	Vorgabe			11,8 -0,2					
	IST-Wert			11,8 -0,2					
	Risiko			Unkritisch					
RPS-Loch in Karosse	Art Freiraumprofil			Durchmesser RPS-Loch Karosse [mm]					
	Vorgabe			12					
	IST-Wert			12,8					
	Risiko			Prüfen					
Konzept Fügen									Kommentar
Spacer	Art Freiraumprofil						Verwendung von Spacern		
	Vorgabe						Ja		
	IST-Wert						Ja		
	Risiko						Unkritisch		
Geometrie Kleberaupe									Kommentar
	Art Freiraumprofil					Einhaltung			offen
	Vorgabe					Ja			
	IST-Wert					Ja			
	Risiko					Unkritisch			
Klebstoff									Kommentar
Klebstoff	Art Freiraumprofil					Art des Klebstoffs			
	Vorgabe					1			
	IST-Wert					1			
	Risiko					Unkritisch			
Klebstoffapplikation	Art Freiraumprofil					Applikation Klebstoff auf Bauteil			
	Vorgabe					Bauteil			
	IST-Wert					Nein			
	Risiko					Kritisch			- Metallrahmen soll in Klebstoffraupe eintauchen

Abbildung 75: Checkliste Delta-Engineering-Produkt geklebtes Dachsystem (Strathmann 2016)

Für das neue Anlagenprojekt ergeben sich Abweichungen von Produktmerkmalen zu realisierten Ressourcen bzgl. der Teilprozesse „Aufnehmen“ und „Fügen“. In diesem Zusammenhang ist eine mögliche Modifikation der produktberührenden Ressourcenelemente zu überprüfen. Hingegen können das Anlieferungskonzept sowie die Applikation des Klebstoffs beibehalten werden. Auch das Gewicht des Dachsystems ist unkritisch. Infolge der Abweichungen des RPS-Lochs im Dachflansch besteht Abstimmungsbedarf hinsichtlich der Produktgestaltung bzw. ist eine Modifikation der Ressource erforderlich. Die Vorgaben für das Fügekonzept, die Kleberaupengeometrie, sind erfüllt.

Abschließend ist die Applikation des Klebstoffs auf der Karosse anstelle des Dachsystems durch eine Konzeptänderung von einem Kunststoff- auf einen Stahlrahmen als kritisch zu klassifizieren. Eine Beibehaltung dieses Produktkonzeptes zieht einen nicht unerheblichen Modifikationsaufwand der Ressource nach sich.

Im Fallbeispiel sowie in der Praxis haben sich Vorzüge der Methodenanwendung gegenüber bestehenden Vorgehensweisen (vgl. Kap. 2.5) manifestiert. Dies hat die Erprobung sowohl für die Integration neuer Fahrzeuge für bestehende Ressourcen als auch für die Realisierung neuer Ressourcen bestätigt. Die bibliothekgestützte Prozessmodellierung ermöglicht ein Frontloading bzgl. der Produkt- und Prozessverknüpfung, denn die relevanten Produktmerkmale können frühzeitig an die Produktentwicklung kommuniziert und über den gesamten Produktentstehungsprozess abgeglichen werden. Abweichungen für Risiken hinsichtlich des Anlagenengineerings werden somit frühzeitig identifiziert. Im Sinne der durchgängigen Datennutzung sind die relevanten Einflussgrößen in einer für die Organisationseinheit geeigneten Form bereitzustellen. Die Freigänge für die Ressourcen können beispielsweise in Form von Hüllkurven in CAD-Systemen hinterlegt werden.

11.2.3 Delta-Engineering Standort

Analog der Delta-Betrachtung für das Produkt ist eine Vorbereitung des Fragenkatalogs auf Basis der Entwurfsbausteine erforderlich. Für die Analyse am ausgewählten Standort erfolgt eine anlagenübergreifende Bündelung der Abfragen. Nach der Vorbereitung des Workshops durch den Fragenkatalog sowie die Dokumentanalyse erfolgte die Hauptuntersuchung mit den Domänen-Experten (vgl. Kap. 7.2.1) am Standort. Folgende Schwerpunkte hinsichtlich der Abweichungen von Hallenstruktur, gesetzlicher Vorschriften, Informationsfluss und Dokumentenanalyse haben sich ergeben:

- Der Übergabebereich der Anlage für geklebte Dachsysteme wird durch Säulen eingeschränkt.

- Die Beschriftung der Anschlüsse der bestehenden Anlage ist unzureichend und muss nachgepflegt werden. Zusätzlich ist die Abnahme der Elektroinstallation erforderlich.
- Es bestehen Probleme mit der SPS bzgl. Qualitätsdatenüberwachung von Verschraubungen.
- Der Elektromotor zur Synchronisation der bestehenden Anlage mit der Fördertechnik ist unterdimensioniert.

Die anlagenübergreifende Abfrage der Domänen erwies sich im Workshop als vorteilhaft. Das Frontloading hinsichtlich der Risikoidentifizierung wurde von den Teilnehmern positiv bewertet. Bedingt durch die systematische Abfrage der Einflussgrößen, konnten Risiken identifiziert werden, die ohne Durchführung des Workshops vermutlich erst während des Aufbaus bzw. der Inbetriebnahme identifiziert worden wären. Bedingt durch die frühzeitige Identifizierung konnten geeignete Maßnahmen frühzeitig initiiert werden.

Mit steigender Anzahl an Workshops reduziert sich der Aufwand für die Erstellung des Fragenkatalogs bei gleichzeitiger Steigerung von dessen Reifegrad. Die Güte des Fragenkatalogs bestimmt das Ergebnis des Delta-Engineering-Umwelt. Voraussetzung für einen möglichst umfassenden Katalog ist die regelmäßige Aktualisierung aus den Erkenntnissen bzgl. der Einflüsse aus den Lebenszyklen der Ressourcen sowie das kritische Hinterfragen durch den Anwender. Neben der Identifizierung von Abweichungen für das Projekt ist es projektübergreifend möglich, häufige Abweichungen zu identifizieren und ggf. Anpassungen an der Ressource vorzunehmen.

11.3 Risikoanalyse bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen

Auf Basis der identifizierten Risiken bzw. Eingangsdaten ist eine Analyse deren in Bezug auf das Projekt möglich. Für die Validierung der Methodik werden im Folgenden die globalen Projektkennzahlen A_i , globalen Risikokennzahlen B_i und die lokalen Risikokennzahlen C_i (vgl. Anhang B, D und C) herangezogen. Basis für die Ausprägung der Kennzahlen bildet ein Expertengremium der verschiedenen Domänen und zwei erfahrener Planer. Für die Validierung wird zwischen der globalen sowie lokalen Analyse der Projektrisiken differenziert (Arbatschat 2016).

11.3.1 Globale Projektrisiko Risikoanalyse

Entsprechend der Projektprämissen sind die kostenbezogenen Projektrisiken PR1-K, PR3-K und PR5-K global zu analysieren. Die Analyseschritte sind in Kapitel 8.1 charakterisiert. In Abbildung 76 ist das Projektgesamtrisiko auf Basis von 100.000 Simulationszyklen für das Fallbeispiel visualisiert. Die x-Achse des Histogramms bildet die kostenbezogenen Projektgesamtkosten PGR-K und die y-Achse die Eintrittswahrscheinlichkeit der Ausprägungen ab. Im gewählten Fallbeispiel ergibt sich aus dem gewählten Sicherheitsbereich von 95% ein Intervall von [34.279€, 150.066€]. Der ausgegebene Wertebereich wird als plausibel erachtet, da sich dieser mit der Kostenüberschreitung realisierter Projekte deckt. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass die Ausgangsgrößen des Risikomodells von der Güte der Eingangsdaten, wie z.B. der Expertise des Teams für die Risikobeurteilung, abhängen.

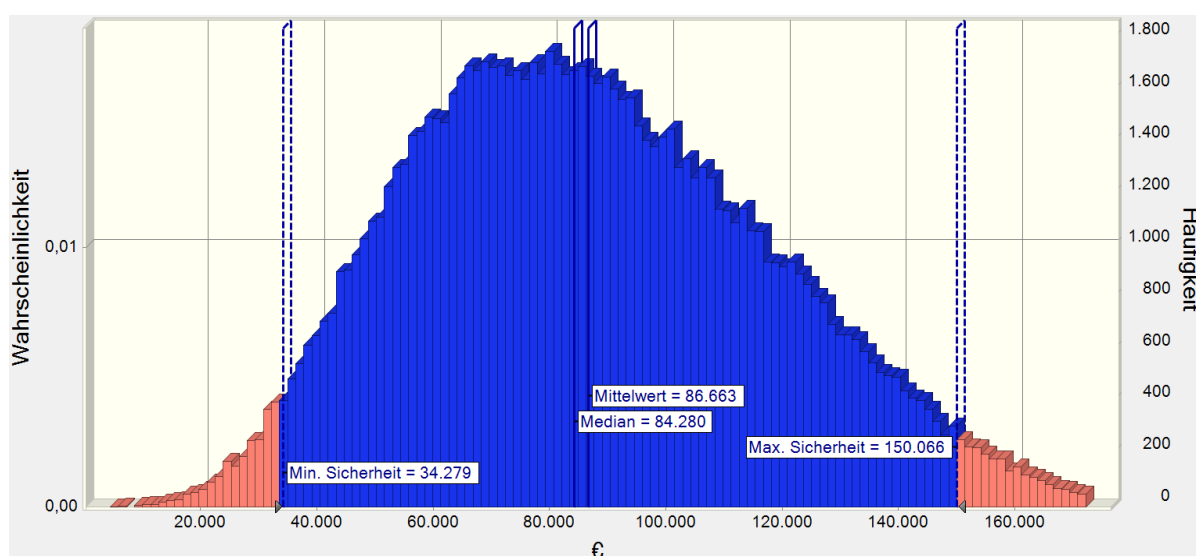


Abbildung 76: Gesamtprojektrisiko geklebtes Dachsystem (Oracle)

11.3.2 Lokale Projektrisikobewertung

Bezugnehmend auf die Projektprämissen gilt es, die kritischen Projektumfänge „Behälter“ sowie „Stellantriebe“ mithilfe der Bayes'schen Netze zu analysieren (vgl. Kap. 8.2). Bezüglich der Behälter sind die verschiedenen Testszenarien „100%-Kontrolle vor Beginn der Fertigung der Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge (VFF)“ und „Stichprobenkontrolle nach Beginn der Fertigung der VFF“ zu untersuchen. Folglich sind die Auftretenswahrscheinlichkeiten der Projektrisiken PRK-1, PRK-3 sowie PRK-5 bei der 100%-Kontrolle geringer. Dieser Sachverhalt ist zuzüglich der Ausgangswahrscheinlichkeiten in Abbildung 77 visualisiert.

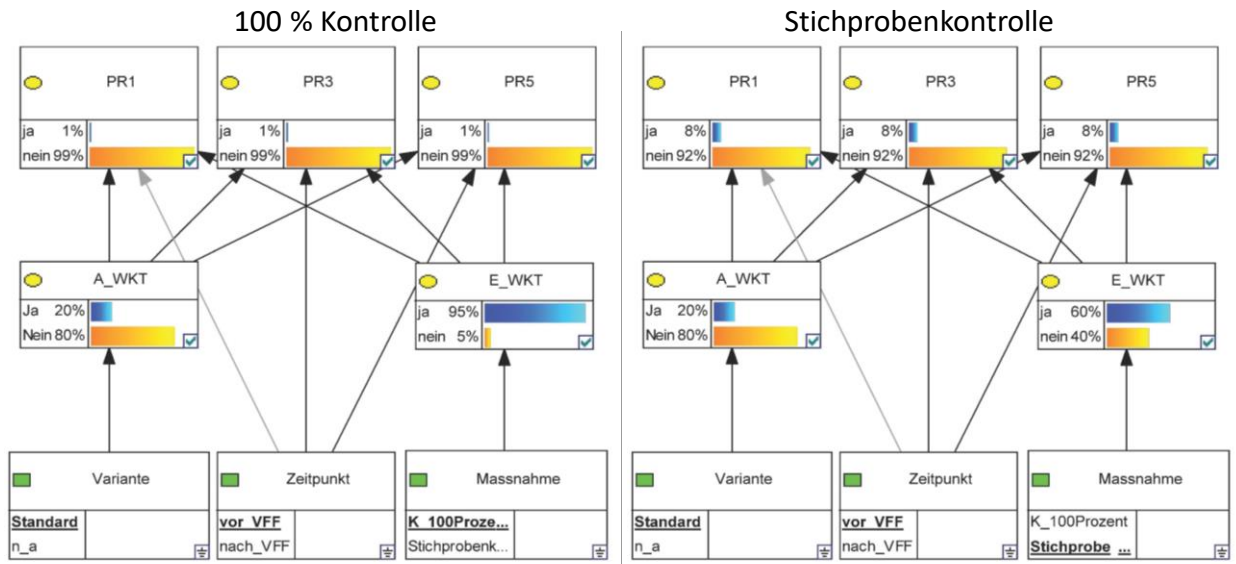


Abbildung 77: Projektisiko Teileträger (BayesFusion)

Weiterhin gilt es, die Bauteilvarianten der Stellantriebe hinsichtlich ihrer Projektisiken zu vergleichen. Hierbei weisen die elektrischen Stellantriebe höhere Projektisiken als die pneumatischen Stellantriebe auf. Die Kausalität bzgl. eines hohen Modifikationsumfangs und eines zu erwartenden hohen Risikos deckt sich mit den ermittelten Ausgangsgrößen der Bayes'schen Netze. Auf Basis der Ausgangsgrößen können die Erwartungswerte (vgl. Tabelle 16) für die Projektisiken ermittelt werden.

Tabelle 16: Projektisiken-Erwartungswert Fallbeispiel geklebtes Dachsystem

Risiken	Behälter		Stellantrieb	
	100 %-Kontrolle	Stichprobenkontrolle	Pneumatisch	Elektrisch
PR1-K	400 €	3.200 €	60 €	480 €
PR3-K	120 €	2.400 €	1.200 €	9.600 €
PR5-K	1.200 €	24.000 €	2.4000 €	19.200 €

11.4 Risikobewertung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen

Abschließend gilt es, die Erkenntnisse aus der Risikoanalyse in die Risikobewertung (vgl. Kap. 9) zu überführen. Diese untergliedert sich in die Risikobetrachtung des Fertigungsprozesses sowie des Projekts.

11.4.1 Risikobewertung von Fertigungsprozessen

Mithilfe des Risikokubus konnte der Handlungsbedarf für die Arbeitssystemgestaltung in verschiedensten Fertigungsbereichen der Automobilindustrie präventiv nachgewiesen werden. Dieser unterstützt das Frontloading im Produktentstehungsprozess. Im Bereich der FMEA-Erstellung ist die Verwendung von A/E-Matrizen für unterschiedliche B-Werte zielführend, denn die Bedeutung der Fehlerfolge einer Ursache ist fixiert. Die definierten

Maßnahmen beeinflussen lediglich die A- bzw. E-Werte. Mit der Bewertung durch eine Matrix ist es für ein Team leicht ersichtlich, welche Maßnahmen für eine bessere Risikoklassifizierung erforderlich sind (vgl. Abbildung 78).

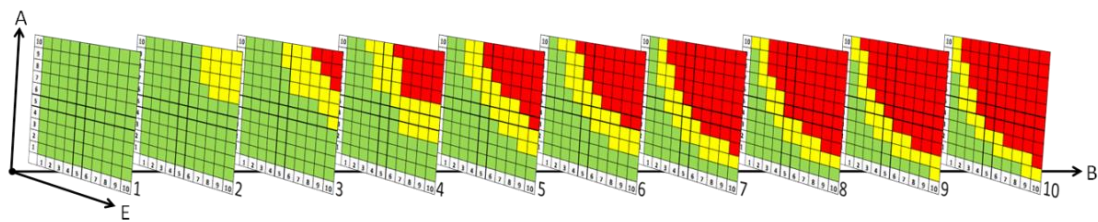


Abbildung 78: Risikokubus A zu E

In Bezug auf die Risikobewertung des Fallbeispiels „Dachsystem Verbau“ führte die Bewertung einer Beanstandung für den Endkunden (B=6), z.B. durch unsachgemäßes Verkleben, mit mäßiger Auftretenswahrscheinlichkeit (A=5), durch z.B. Toleranzen der Spacer beim Fügen, nach VDA-Risikomatrix zu zwingendem Handlungsbedarf. Doch durch 100%-Kontrolle, z.B. durch Dichtigkeitsprüfung, zieht dies entsprechend des Risikokubus keinen zwingenden Handlungsbedarf nach sich. Die Folge der Kundenbeanstandung liegt nicht vor, da der Fehler noch beim Hersteller entdeckt wird. Die Kosten für die Nacharbeit beim Hersteller müssen separat bewertet werden.

Die Einführung des Risikokubus hat die Qualität des Berichtswesens der P-FMEA gesteigert, denn nun ist es möglich, die Risiken unter Einsatz von Entdeckungsmaßnahmen darzustellen. Das Berichtswesen untergliedert sich zweistufig in Risiken nach Einsatz präventiver Maßnahmen und die anschließend verbleibenden Risiken durch den Einsatz zusätzlicher Prüfungen (vgl. Abbildung 69).

Darüber hinaus sind die Risikokennzahlen durch die RPZ^K objektiver und FMEA-Sitzungen effektiver, da Diskussionen über die Notwendigkeit von Maßnahmen entfallen. Gleichzeitig ist mit der Nutzung von Excel-Makros bzw. der Implementierung in die FMEA-Software der Aufwand zur Bewertung mittels Risikokubus marginal.

11.4.2 Risikobewertung von Fertigungsprozessen im Anlagenengineering

Aus den Risikoanalysen (vgl. 11.3) leitet sich ein Risikobericht für die globalen sowie lokalen Projektrisiken ab. In diesem Zusammenhang können die Einflüsse der einzelnen Projektrisiken PR1-K, PR3-K und PR5-K auf das Projektgesamtrisiko PGR-K in einem Tornadodiagramm visualisiert werden. Diese Darstellungsform dient als Grundlage für die Priorisierung der Risikomanagementaktivitäten (vgl. Abbildung 79) (Arbatschat 2016).

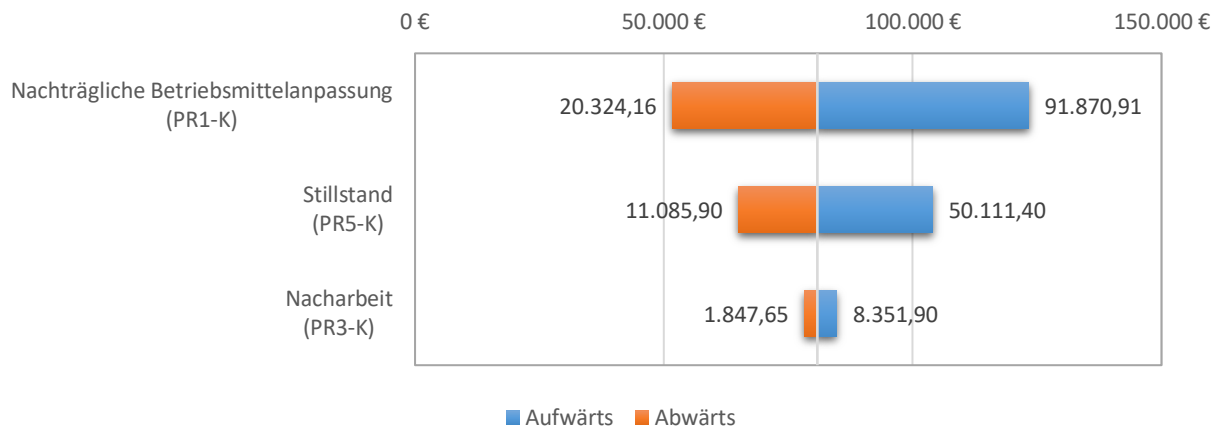


Abbildung 79: Sensitivität Globales Projektgesamtrisiko PGR-K (Oracle)

Abbildung 80 dient der Darstellung der zeitvarianten lokalen Projektrisiken. Exemplarisch sind die Risiken für den Umfang Behälter dargestellt. Es wird der Zusammenhang zwischen Risiko und dem Zeitpunkt der Prüfmaßnahme herausgestellt, was die Ableitung der Maßnahmenterminierung vereinfacht. Die Absicherung der Behälter nach VFF erhöht die Projektrisikokosten um ein Vielfaches. Die Prüfkosten vor VFF sind mit den Projektrisikokosten zu evaluieren.

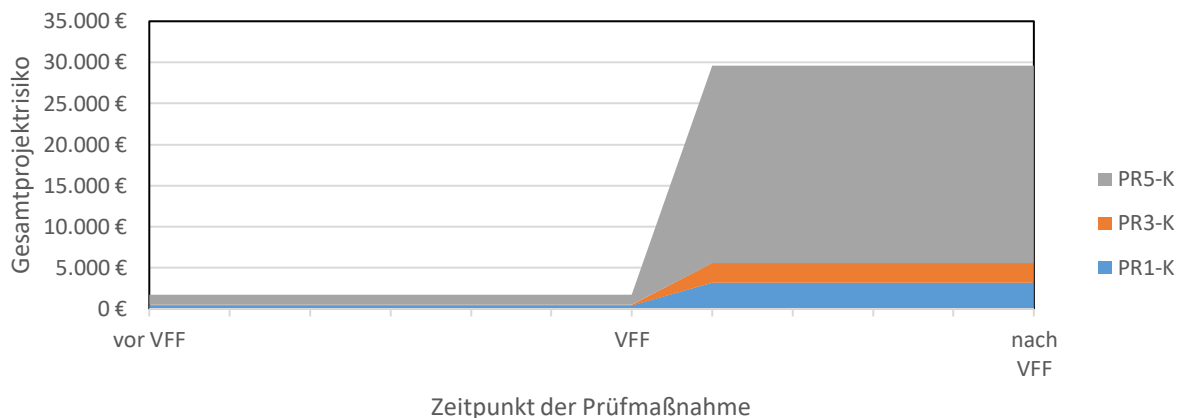


Abbildung 80: Lokales Projektrisiko durch Behälter – Zeitvariante Visualisierung

12 Zusammenfassung und Ausblick

Die projektübergreifende Wiederverwendung von Entwurfselementen im Anlagenengineering ist eine mögliche Lösung zur Realisierung effizienter sowie wandlungsfähiger Produktionssysteme in der volatilen Umwelt. Darüber hinaus heben innovative Ansätze, wie beispielsweise das RAMI 4.0, weitere Potentiale durch die übergreifende Betrachtung der Lebenszyklen von Anlagen, Komponenten sowie der zu fertigenden Erzeugnisse. In diesem Zusammenhang ist die Anwendung etablierter Management- sowie Planungsmethoden zur Beherrschung der Komplexität zu hinterfragen. Die Entscheidungen während des Anlagenengineerings induzieren eine Vielzahl von Risiken durch den offenen Eintritt zukünftiger Ereignisse (vgl. Kap. 1).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden der Handlungsbedarf für die Risikobeurteilung bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen identifiziert sowie mögliche Lösungsansätze erarbeitet und praktisch umgesetzt. Während der betrachtete Zeitraum für die Risikobeurteilung an das Projekt gekoppelt ist und folglich mit der Auftragserstellung beginnt und mit dem Hochlauf der Produktion endet, erstreckt sich der Lebenslauf der betrachteten Entwurfselemente ggf. über mehrere Lebenszyklen der zu produzierenden Erzeugnisse oder auch der Ressourcen. Eine effiziente Risikobeurteilung muss folglich die erzeugten Informationen der Artefakte aus verschiedenen Lebenszyklen für die zu beurteilende Risikosituation bei gleichzeitiger Aufwandsminimierung berücksichtigen (vgl. Kap. 2 und 4).

Bedingt durch die Herkunft der Fragestellung aus dem anwendungsbezogenen Kontext startet und endet die Fragestellung in der Praxis. Charakteristisch für die angewandte Wissenschaft ist die Gegenüberstellung des erfassten und typisierten praxisrelevanten Problems mit den bestehenden Theorien zur Ableitung und anschließenden Abhandlung des Handlungsbedarfs. Der Handlungsbedarf erstreckt sich von der fehlenden Anlagenstrukturierung als Voraussetzung zur Risikoidentifizierung bei der Wiederverwendung bis zur abschließenden quantitativen sowie qualitativen Risikobewertung (vgl. Kap. 5).

Das Risikomodell betrachtet die zu beurteilende Ressource als geschlossenes System, welches definierte Elemente sowie vorbestimmte Verknüpfungen aufweist. Im Rahmen des Projektmanagements sind das Ressourcen-Modell sowie die Annahmen kontinuierlich mit der Realität des Realisierungsprojektes abzugleichen. Die Risikobeurteilung entspricht resultierend immer dem Modellstatus und nicht der Realität. Die Latenz zwischen Modell und Projektrealisierung ist durch den Anwender zu minimieren.

Die vorgestellte Anlagenstruktur (vgl. Kap. 6) repräsentiert den Status quo der verschiedenen Gewerke in der Automobilproduktion. Neben der Produktarchitektur bildet diese eine Grundlage für die systematische Wiederverwendung sowie Risikobeurteilung der entworfenen Anlagenelemente. Mit der Pilotierung der Struktur an diversen Produktionssystemen verschiedenster Industrien konnte eine Übertragbarkeit für diese nachgewiesen werden. Bedingt durch die enge Verknüpfung mit der Ablauf- sowie Produktstruktur ist eine Pauschalisierung für alle Produktionssysteme jedoch nicht gegeben und die Granularität der Klassifizierung entsprechend fallspezifisch zu wählen.

Die durch das Anlagenengineering induzierten und beeinflussbaren Risiken wirken auf das Realisierungsprojekt und sind bzgl. Kosten und Zeit quantitativ erfassbar sowie bzgl. der Prozessgüte qualitativ bewertbar. Resultierend untergliedert sich das Risikomodell in ein qualitatives Modul für Prozessrisiken sowie ein lokales und globales Risikomodul für quantitative Projektkennzahlen. Allgemein ist in Bezug auf die Ausprägung des Risikowerts zu berücksichtigen, dass dieser einen statistischen Wert ohne Verbindlichkeit repräsentiert, da der Eintritt des zukünftigen Ereignisses offen ist (vgl. Kap. 3).

Für eine effiziente Risikobeurteilung startet diese analog zum Planungsprozess bei bestehenden Entwurfselementen auf der Basis von Bibliotheksbausteinen. Diese subsumieren neben ihrer Funktionsbeschreibung die relevanten Einflussgrößen sowie Fehlfunktionen, die über den Lebenszyklus der Elemente charakterisiert werden. Mit der Bibliothekserstellung geht ein nicht unerheblicher Aufwand einher. In dieser Arbeit wurde lediglich das Rahmengerüst für die Bibliothek an Fallbeispielen charakterisiert. Die Informationen gilt es anschließend für alle Elemente in Form von Bibliotheksbausteinen zu hinterlegen und die Stakeholder in den Organisationseinheiten über den Lebenszyklus des Anlagenelements für deren Erstellung sowie Pflege zu qualifizieren. Die Grundlast für die Bibliothekserstellung sowie -pflege für ein Entwurfselement in Bezug auf die Risikobeurteilung sinkt jedoch mit jeder weiteren Realisierung eines Entwurfselements (vgl. Kap. 7.1).

Die Bibliotheksstruktur ermöglicht eine projektübergreifende Delta-Betrachtung bzgl. der Schnittstellen zum Produkt, zur Anlagenumgebung sowie im Rahmen des Änderungsmanagements auch ressourcenintern. Die Methodenanwendung unterstützt neben der Risikoidentifizierung auch die Optimierung der Entwurfselemente. Einerseits können häufige Einfluss-Abweichungen zu einer Überarbeitung der Anforderungen für spätere Elemente genutzt werden. Andererseits liegen Wirkzusammenhänge zur Störungsbeseitigung zumeist vor und können für komplexe Verknüpfungen zwischen Einflüssen und

späteren Fehlerfolgen, beispielsweise mithilfe neuronaler Netze, erfasst werden (vgl. Kap. 7.2 und 7.3).

Die Pflege der Datensätze innerhalb der Bibliothek über den Lebenszyklus der Elemente obliegt dem Anwender. Umfang und Güte der dokumentierten Daten sind insbesondere für die quantitative Risikobewertung der globalen und lokalen Projektrisiken entscheidend. Häufig existieren diese in der Praxis nicht und es wird für die Hypothesenbildung ausschließlich auf Expertise der Stakeholder zurückgegriffen. Kap. 7.4 liefert einen Vorschlag für die erste Dokumentationsiteration bzgl. relevanter Einflussgrößen. Die Attributauswahl ist jedoch kontextspezifisch auszuwählen und ggf. entsprechend zu adaptieren.

Die Risikoanalyse und -bewertung fußt mit der FMEA, Monte-Carlo-Simulation sowie den Baye'sche Netzen auf bestehenden Methoden. Die Intention des Methodenanwenders sowie der Anwendungskontext determinieren die Methodenauswahl sowie -anwendung, denn mit den Methoden ist ein teilweise nicht unerhebliche Ressourcenaufwand verbunden. Infolge der Modellcharakteristika werden Extremereignisse mit geringen Wahrscheinlichkeiten sowie noch nicht in der Bibliothek charakterisierte Einflüsse nicht berücksichtigt. Fehlerhafte Eingangsdaten, beispielsweise durch die Subjektivität bei der Annahme von Art und Ausprägung der Verteilungsfunktionen, verfälschen die Analyseergebnisse zusätzlich. Resultierend sind neben den Nutzungen der Risikobewertung durch die Methoden sowie den bestehenden Erkenntnissen mögliche potentielle Risiken über den Projektverlauf fortlaufend von allen Stakeholdern im Projekt zu hinterfragen (vgl. Kap. 8 und 9). Weiterhin ist das vorgestellte Rahmenwerk aus Methoden, analog dem Risikomanagementprozess, fortlaufend zu bewerten und ggf. anzupassen.

Das vorgestellte Konzept zur Ableitung eines anwendungsspezifischen Risikokubus steigert die Güte für die Bewertung von Prozessrisiken. Während die Ableitung in dieser Arbeit für die Automobilindustrie erfolgt, ist ein Übertrag durch die Nutzung für den anwendungsfallspezifizierten Bewertungskatalog, der möglichst keine multivariaten Abhängigkeiten auf eindimensionalen Skalen abbildet, möglich. Voraussetzung bilden eine Vielzahl bestehender FMEAs sowie ein bzgl. der Methoden-Expertise homogenes FMEA-Moderatoren-Team (vgl. Kap. 9.1).

Die Gesamtheit der Risikobewertungen liefert anschließend den Risikobericht für den betrachteten Projektumfang. Die im Rahmen der Risikobeurteilung erzeugten Informationen sind fortlaufend zu dokumentieren sowie zu kommunizieren. Die dokumentierten Daten

erlauben die Methodik bzgl. identifizierter und bewerteter Risiken sowie initiiertes Maßnahmen kontinuierlich abzugleichen und ggf. zu modifizieren.

Die Methoden zur Risikobeurteilung wurden in diversen Fahrzeugprojekten erfolgreich erprobt (vgl. Kap. 11). Ein effizientes Rollout der Methode innerhalb der Engineering-Organisation bedingt neben der Prozessbeschreibung (vgl. Kap. 10) eine EDV-Unterstützung für den Anwender. Insbesondere die lebenszyklenübergreifende Verknüpfung sowie Nutzung von Informationen ist nur mit geeigneten Datenaustauschformaten wie beispielsweise AutomationML abbildbar (Drath 2010). Auch die Verknüpfung innerhalb des Risikobeurteilungsprozesses ist ganzheitlich sicherzustellen. Beispielsweise erfolgen aktuell der Übertrag der identifizierten Abweichungen in die Risikoanalyse manuell sowie die Risikoberichte mittels Risikokubs durch ein Excel-Makro. Mit einer einheitlichen Oberfläche innerhalb einer FMEA-EDV-Software erhöhen sich der Bedienkomfort sowie die Akzeptanz beim User. Neben der Fokussierung auf die Entstehungs-Phase sind auch die Schnittstellen für die Nutzungs- und Entsorgungs-Phase zu spezifizieren. Weiterhin ist für die Reduzierung der Softwareseitigen Schnittstellen durch die verschiedenen Bewertungsmethoden zu prüfen, ob diese zukünftig auch durch ein Tool, das alle Methoden abdeckt, realisierbar ist.

Mit der Anwendung der konzipierten Methoden können die Risiken modularer Produktionssysteme effizient beurteilt werden, um die Anlaufsituation bei der Wiederverwendung von Entwurfselementen nachhaltig zu optimieren. Die Methode unterstützt die Schaffung definierter Integrationsbedingungen für die Elemente. In Bezug auf den Engineering- sowie Absicherungsaufwand durch die Risikobeurteilung ist die Granularität der wiederverwendbaren Elemente zu hinterfragen. Diese wird durch die Modularität der einzelnen Elemente des Produktionssystems (Schuh 2012) definiert. Entsprechend sind für die Integration in bestehende Produktionssysteme in Abhängigkeit von dem Engineering- sowie Ressourcenaufwand spezifizierte Strategien zu definieren. Insbesondere das Vorgehen zur Integration neuer Elemente in realisierte Strukturen in die Fließfertigung der Montage, beispielsweise analog (Frauenfelder 1999), ist mithilfe der vorgestellten Methoden fallspezifisch ganzheitlich zu bewerten. Neben der Schaffung der erforderlichen Rahmenbedingungen für das Anlagenengineering, wie z.B. die Schaffung einer geeigneten Systemlandschaft für das Engineering, bedarf es der Qualifikation der Organisationseinheit (VDI/VDE 3695-3).

Die Übertragbarkeit der Methoden auf weitere Anwendungsfälle, beispielsweise die Entwicklung von Konsumprodukten oder andere Branchen, ist zu überprüfen. Weiterhin

konnte die Nutzbarkeit für Neuentwicklungen von Anlagenelemente, die noch keine Iterationsschleifen durchlaufen und lediglich im Labor erprobt wurden, nachgewiesen werden. Mit der frühzeitigen Identifikation von Zielabweichungen zwischen Labor und Serienbetrieb, können Abweichungen präventiv behoben werden, um die Technologien für die Serie zu qualifizieren. Mit jeder weiteren Realisierung steigt gleichzeitig die Erprobungstiefe der Entwurfs-elemente. In diesem Zusammenhang gilt es in weiterführenden Arbeiten die optimale Häufigkeit sowie Intensität für die Risikobeurteilung in Abhängigkeit vom Reifegrad zu bestimmen, damit durch die Ressourcenbindung die Risikobeurteilung nicht ein Risiko für die Kernprozesse der Engineering-Organisation wird.

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen unter Mitwirkung des Autors, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden sind:

(Hell et al. 2016)

(Lüder et al. 2017a)

(Lüder et al. 2017b)

(Lüder et al. 2017c)

(Röpke et al. 2016)

(Röpke et al. 2015)

(Schmidt et al. 2016)

(Zawisza et al. 2016)

Betreute Abschlussarbeiten, die im Zusammenhang mit diesem Dissertationsvorhaben entstanden, vom Autor betreut wurden und in folgende Kapitel eingeflossen sind:

(Kutzbora 2015), Kap. 7.1 und 11.2.1,

(Arbatschat 2016), Kap. 7.4, 8, 9.2, 11.3, 11.4.2 sowie Anhang B, C und D,

(Seifert 2016), Kap. 7.2 und 11.2.3,

(Strathmann 2016), Kap. 7.3 und 11.2.2,

(Herzog 2018), Kap. 2.5 und

(Luce 2018), Kap. 2.5.

- Abramson, Robert; Stephen, Book (1990): A Quantification Structure for Assessing Risk-Impact Drivers based on the Risk-Driver Scales of F.D. Maxwell. In: U.S. Army Freedom of Information Office (Hg.): 24th Annual DoD Analysis Cost Symposium. Leesburg, 5-7 September. The Aerospace Corporation.
- Ackermann, Karl-Friedrich (1999): Risikomanagement im Personalbereich. In: Karl-Friedrich Ackermann (Hg.): Risikomanagement im Personalbereich. Reaktionen auf die Anforderungen des KonTraG. Wiesbaden: Gabler, S. 43–102.
- Albers, Albert; Scherer, Helmut; Bursac, Nikola; Rachenkova, Galina (2015): Model Based Systems Engineering in Construction Kit Development – Two Case Studies. In: *Procedia CIRP* 36, S. 129–134. DOI: 10.1016/j.procir.2015.01.044.
- Alfen, Hans Wilhelm; Riemann, Alexander; Leidel, Katja; Daube, Dirk; Frank-Jungbecker, Andrea; Gleißner, Werner; Wolfrum, Marco (Hg.) (2010): Lebenszyklusorientiertes Risikomanagement für PPP-Projekte im öffentlichen Hochbau. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt. Bauhaus-Universität Weimar. Weimar: Bauhaus-Univ. Verlag (Schriftenreihe der Professur Betriebswirtschaftslehre im Bauwesen, 11).
- Allweyer, Thomas (2005): Geschäftsprozessmanagement. Strategie, Entwurf, Implementierung, Controlling. 5. Aufl. Herdecke, Bochum: W3L (IT lernen).
- Arbatschat, Felix, Martin (2016): Projektrisiken in der Betriebsmittelplanung am Beispiel der Automobilenendmontage. Masterarbeit Leibniz Universität Hannover. Hannover.
- Basler Ausschuss für Bankenaufsicht (2003): Management operationeller Risiken – Praxisempfehlungen für Banken und Bankenaufsicht. Online verfügbar unter <http://www.bis.org/publ/bcbs96de.pdf>, zuletzt geprüft am 14.07.2016.
- Bauch, Ulrich (1994): Beitrag zur Risikobewertung von Bauprozessen. Dissertation Technische Universität Dresden. Dresden.
- BayesFusion, L. L.C.: GeNle. Software.
- Beinert, Claudia (2003): Bestandsaufnahme Risikomanagement. In: Peter Reichling (Hg.): Risikomanagement und Rating. Grundlagen, Konzepte, Fallstudie. Wiesbaden: Gabler, S. 21–42.
- Bepperling, Sonja-Lara (2008): Validierung eines semi-quantitativen Ansatzes zur Risikobeurteilung in der Eisenbahntechnik. Dissertation Technische Universität Braunschweig.

- Bernstein, Peter L. (2017): *Wider die Götter. Die Geschichte der modernen Risikogesellschaft*. 3. Aufl. Hamburg: Murmann Publishers.
- Biegert, Uwe (2000): *Sichere Automatisierungssysteme mit Hilfe qualitativer Modellierung und quantitativer Risikobewertung*. Konferenzbeitrag. In: Dietmar P. F. Möller (Hg.): *Simulationstechnik*. 14. Symposium. Hamburg, 28-29 September. Gesellschaft für Informatik. Ghent: SCS-Europe BVBA (Fortschrittsberichte Simulation, 7), S. 211–216.
- Biffi, Stefan; Lüder, Arndt; Gerhard, Detlef (Hg.) (2017): *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects*. 1. Aufl. Cham: Springer.
- Bischoff, Raphael (2007): *Anlaufmanagement. Schnittstelle zwischen Projekt und Serie*. 1. Aufl. Konstanz: Hochschule Konstanz (Konstanzer Managementschriften, 2).
- Bitz, Horst (2000): *Risikomanagement nach KonTraG. Einrichtung von Frühwarnsystemen zur Effizienzsteigerung und zur Vermeidung persönlicher Haftung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Schriftenreihe Der Betrieb).
- Bleicher, Knut (2004): *Das Konzept integriertes Management. Visionen - Missionen - Programme*. 7. Aufl. Frankfurt/Main: Campus (St. Galler Management-Konzept, 1).
- Borth, Michael (2004): *Wissensgewinnung auf Bayes-Netz-Mengen*. Dissertation Universität Ulm. Ulm.
- Bracht, Uwe; Geckler, Dieter; Wenzel, Sigrid (2011): *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. Berlin and Heidelberg: Springer.
- Braun, Herbert (1984): *Risikomanagement. Eine spezifische Controllingaufgabe*. Dissertation Universität Stuttgart. Darmstadt: Toeche-Mittler (Controlling-Praxis CP, 7).
- Brühwiler, Bruno (2001): *Unternehmensweites Risk Management als Frühwarnsystem. Methoden und Prozesse für die Bewältigung von Geschäftsrisiken in integrierten Managementsystemen*. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt.
- Brühwiler, Bruno (2007): *Risikomanagement als Führungsaufgabe. Unter Berücksichtigung der neuesten internationalen Standardisierung*. 2. Aufl. Bern, Stuttgart, Wien: Haupt (Risikomanagement).
- Brünger, Christian (2011): *Nutzenkonsistente Risikopriorisierung. Die Risk-Map im Kontext rationaler Entscheidungen*. Dissertation Universität Paderborn. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

- Buchhart, Anton; Burger, Anton (2001): Risiko-Controlling. Oldenbourg: De Gruyter Oldenbourg (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).
- Bullinger, Hans-Jörg (1994): Einführung in das Technologiemanagement. Modelle, Methoden, Praxisbeispiele. Wiesbaden: Vieweg+Teubner (Technologiemanagement - Wettbewerbsfähige Technologieentwicklung und Arbeitsgestaltung).
- Burghardt, Manfred (2012): Projektmanagement. Leitfaden für die Planung, Überwachung und Steuerung von Projekten. 9. Aufl. Erlangen: PUBLICIS Verlag.
- Bursać, Nikola (2016): Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung. Dissertation Universität Karlsruhe. Karlsruhe.
- Cisek, Robert; Habicht, Christian; Neise, Patrick (2002): Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. In: *ZWF* 97 (9), S. 441–445. DOI: 10.3139/104.100566.
- Conrady, Stefan; Jouffe, Lionel (2015): Bayesian Networks and BayesiaLab. A Practical Introduction for Researchers. Franklin, TN: Bayesia USA.
- Cottin, Claudia; Döhler, Sebastian (2013): Simulationsmethoden. In: Claudia Cottin und Sebastian Döhler (Hg.): Risikoanalyse. Modellierung, Beurteilung und Management von Risiken mit Praxisbeispielen. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 369–426.
- Crezelius, Susanne (2015): PROMIDIS Handlungsleitfaden. Instrument LIPK Diagramm. Online verfügbar unter <https://www.inf.uni-hamburg.de/de/inst/ab/itmc/research/completed/promidis/instrumente/lipok-diagramm>.
- Dannenberg, Jan (2005): Von der Technik zum Kunden. In: Bernd Gottschalk, Ralf Kalmbach und Jan Dannenberg (Hg.): Markenmanagement in der Automobilindustrie. Die Erfolgsstrategien internationaler Top-Manager. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 33–58.
- Darwiche, Adnan (2008): Chapter 11 Bayesian Networks. In: Frank van Harmelen, Vladimir Lifschitz und Bruce Porter (Hg.): Handbook of Knowledge Representation, Bd. 3. Burlington: Elsevier Science & Technology Books (Foundations of Artificial Intelligence), S. 467–509.
- Denk, Robert; Exner-Merkelt, Karin (2005): Corporate Risk Management. Unternehmensweites Risikomanagement als Führungsaufgabe. Wien: Linde Verlag (Fachbuch Wirtschaft).

Deutsch, Hans-Peter (2004): Derivate und interne Modelle. Modernes Risikomanagement. 3. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

Döbele, Mathias (2009): Methode zur Wiederverwendung von Planungskomponenten für die Planung automatisierter Fertigungsanlagen. In: VDI (Hg.): 10. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik (Automation). Baden-Baden, 16-17 Juni. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2067), S. 421–425.

Dräger, Erich; Rößler, Steffen (2011): Projektorientiertes Prozessmanagement - Fliegen wie ein Fisch. 1. Aufl. Röthenbach: Resultance.

Drath, Rainer (2010): Datenaustausch in der Anlagenplanung mit AutomationML. Integration von CAEX, PLCopen XML und COLLADA. 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

Eberhardt, Otto (2008): Gefährdungsanalyse mit FMEA. Die Fehler-Möglichkeiten- und Einfluss-Analyse gemäß VDA-Richtlinie ; mit Anwendungsbeispiel "Gefährdung von Maschinen". 2. Aufl. Renningen: expert-Verlag (Edition expertsoft, 63).

Eckert, Detlef (1985): Risikostrukturen industrieller Forschung und Entwicklung. Theoretische. und empirische Ansatzpunkte einer Risikoanalyse technologischer Innovationen. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Technological economics, 11).

Ehrlenspiel, Klaus; Kiewert, Alfons; Lindemann, Udo; Mörtl, Markus (2014): Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren. Kostenmanagement bei der integrierten Produktentwicklung. 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Eilenberger, Guido; Ernst, Dietmar; Toebe, Marc (2013): Betriebliche Finanzwirtschaft. Einführung in Investition und Finanzierung, Finanzpolitik und Finanzmanagement von Unternehmungen. 8. Aufl. München: Oldenbourg.

Eversheim, Walter (1992): Flexible Produktionssysteme. In: Erich Frese (Hg.): Enzyklopädie der Betriebswirtschaftslehre. 3. Aufl. Stuttgart: Poeschel, S. 2058–2066.

Faßbender-Wynands, Ellen (2001): Umweltorientierte Lebenszyklusrechnung. Instrument zur Unterstützung des Umweltkostenmanagements. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Feldhusen, Jörg; Gebhardt, Boris (2008): Product Lifecycle Management für die Praxis. Ein Leitfaden zur modularen Einführung, Umsetzung und Anwendung. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Fiege, Stefanie (2006): Risikomanagement- und Überwachungssystem nach KonTraG. Prozess, Instrumente, Träger. Dissertation Technische Universität Berlin. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.
- Fischäder, Holm (2007): Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen. Dissertation Technische Universität Ilmenau. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Schriften zum Produktionsmanagement).
- Fitzek, Daniel (2006): Anlaufmanagement in Netzwerken. Grundlagen, Erfolgsfaktoren und Gestaltungsempfehlungen für die Automobilindustrie. Dissertation Universität St. Gallen. Bern [u.a.]: Haupt (Schriftenreihe Logistik der Kühne-Stiftung, 8).
- Frauenfelder, M. (1999): Anpassungsfähige Anlagenkonzepte für die Großserienmontage. In: Joachim Milberg und Gunther Reinhart (Hg.): Stückzahlflexible Montagesysteme. Lösungen für eine bedarfsgerechte Montage ; München,, Bd. 42. München, 4 Februar. IWB. München: Utz (Seminarberichte / Iwb, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, 42), S. 4–19.
- Freudenmann, Helmut (1965): Planung neuer Produkte. Stuttgart: Poeschel.
- Frey, Herbert C.; Nießen, Gero (2001): Monte-Carlo-Simulation. Quantitative Risikoanalyse für die Versicherungsindustrie. München: Gerling Akademie Verlag.
- Gadatsch, Andreas (2013): Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Methoden und Werkzeuge für die IT-Praxis: Eine Einführung für Studenten und Praktiker. 7. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.
- Gebhardt, Günther; Mansch, Helmut (2001): Risikomanagement und Risikocontrolling in Industrie- und Handelsunternehmen. Empfehlungen des Arbeitskreises "Finanzierungsrechnung" der Schmalenbach-Gesellschaft für Betriebswirtschaft e. V. Düsseldorf [u.a.]: Verlag-Gruppe Handelsblatt (Schmalenbachs Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung, 46).
- Gebhart, Nicolas; Kruse, Moritz; Krause, Dieter (2016): Gleichteile-, Modul- und Plattformstrategie. In: Udo Lindemann (Hg.): Handbuch Produktentwicklung. München: Hanser, S. 111–149.
- Gehring, Uwe W.; Weins, Cornelia (2009): Grundkurs Statistik für Politologen und Soziologen. 5. Aufl. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Gleißner, Werner (2006a): Serie Risikomaße und Bewertung Teil 2: Downside-Risikomaße. Risikomaße, Safety-First-Ansätze und Portfoliooptimierung. In: *Risiko Manager* (13), S. 17–23.

Gleißner, Werner (2006b): Serie Risikomaße und Bewertung Teil 3: Kapitalmarktmodelle. Alternative Risikomaße und Unvollkommenheit des Kapitalmarkts. In: *Risiko Manager* (14), S. 14–20.

Gleißner, Werner; Wolfrum, Marco (2009): Risikomaße, Performancemaße und Rating: die Zusammenhänge. In: Reavis Mary Hilz-Ward und Oliver Everling (Hg.): *Risk Performance Management. Chancen für ein besseres Rating*. Wiesbaden: Gabler, S. 89–109.

Gleißner, Werner; Wolfrum, Marco (2019): *Risikoaggregation und Monte-Carlo-Simulation. Schlüsseltechnologie für Risikomanagement und Controlling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (essentials).

Göpfert, Ingrid; Braun, David; Schulz, Matthias (Hg.) (2017): *Automobillogistik. Stand und Zukunftstrends*. Springer Fachmedien Wiesbaden. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler.

Gössling, Andreas (2014): *Device Information Modeling in Automation - A Computer-Scientific Approach*. Dissertation Technische Universität Dresden. Dresden.

Gottwald, Richard (1990): *Entscheidung unter Unsicherheit. Informationsdefizite und unklare Präferenzen*. Wiesbaden: Gabler (Betriebswirtschaftliche Forschung zur Unternehmensführung, 23).

Greenberg, Marc (2014): *Expert Elicitation of a Maximum Duration using Risk Scenarios*. In: NASA (Hg.): *NASA Cost Symposium*. Hampton, 12-14 August. NASA Langley Research Center.

Gutmannsthal-Krizanits, Harald (1994): *Risikomanagement von Anlagenprojekten. Analyse, Gestaltung und Controlling aus Contractor-Sicht*. Wiesbaden, s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Gabler Edition Wissenschaft).

Haberfellner, Reinhard; Daenzer, Walter F. (Hg.) (2002): *Systems Engineering. Methodik und Praxis*. 11. Aufl. Zürich: Verlag Industrielle Organisation.

Hady, Łukasz; Wozny, Günter (2012): *Multikriterielle Aspekte der Modularisierung bei der Planung verfahrenstechnischer Anlagen*. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84 (5), S. 597–614. DOI: 10.1002/cite.201100175.

Hänggi, Roman (1996): *Risikomanagement und Simultaneous Engineering*. Dissertation Hochschule für Wirtschafts-, Rechts- und Sozialwiss. St. Gallen. St. Gallen.

- Harrant, Horst; Hemmrich, Angela (2004): Risikomanagement in Projekten. 1. Aufl. München: Hanser (Projektmanagement kompakt).
- Heinen, Tobias; Rimpau, Christoph; Wörn, Arno (2008): Wandlungsfähigkeit als Ziel der Produktionssystemgestaltung. In: Peter Nyhuis (Hg.): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: TEWISS, S. 19–32.
- Hell, Kristofer (2018): Methoden der projektübergreifenden Wiederverwendung im Anlagenentwurf. Dissertation Universität Magdeburg. Magdeburg.
- Hell, Kristofer; Hillmann, Robin; Lüder, Arndt; Röpke, Hannes; Zawisza, Jacek; Schmidt, Nicole; Calà Ambra (2016): Demands on Virtual Representation of Physical Industrie 4.0 Components. In: Eugenio Brusa (Hg.): Proceedings of of the 2nd INCOSE Italia Conference on Systems Engineering. 2nd INCOSE Italia Conference on Systems Engineering. Turin, 14-16 November (1728), S. 65–71.
- Helten, Elmar (1994): Die Erfassung und Messung des Risikos. Studententext 11. In: Werner Asmus und Jürgen Gassmann (Hg.): Versicherungswirtschaftliches Studienwerk. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler.
- Hempel, Mario; Offerhaus, Jan (2008): Risikoaggregation als wichtiger Aspekt des Risikomanagements. In: Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement e.V. (Hg.): Risikoaggregation in der Praxis. Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 3–13.
- Herrmann, Christoph (2010): Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).
- Herzog, Jan (2018): Entwicklung und Validierung eines Trägersystems für einen Greiferbaukasten am Beispiel des Türeineinbaus in der Automobilendmontage. Masterarbeit Hochschule Osnabrück.
- Hill, Philipp Johannes (2012): Simulative Risikoanalyse von Biomethanprojekten. Ein operativer Ansatz zur Implementierung simulativer Risikoanalysen in das Risikomanagementsystem von Investoren eines Biomethanprojektes. Dissertation Universität Kassel. München.
- Hoffmann, Georg; Neumann, Thorsten (2011): Management innerer Risiken. Rechtsgrundlagen und praxisorientierte Durchführungshilfe für ein internes, kostenoptimiertes

und effizientes Risikomanagement - Normen und technische Regeln zur Betriebssicherheit: DIN VDE 0105-100, DIN EN 62305-2 (VDE 0185-305-2), TRBS 1203, TRBS 1111. 2. Aufl. Berlin [u.a.]: VDE-Verlag (VDE-Schriftenreihe - Normen Verständlich, 129).

Hofmann, Jürgen (2000): Risikobasierte Instandhaltung. In: Maintenance ideas. Von der technischen Diagnose zur betriebswirtschaftlichen Prognose. Aachen, 16-17 Mai. VDI/VDEh-Forum Instandhaltung & AKIDA. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 1554), S. 649–664.

Hölscher, Reinhold (2002): Von der Versicherung zur integrativen Risikobewältigung: Die Konzeption eines modernen Risikomanagements. In: Reinhold Hölscher und Ralph Elfggen (Hg.): Herausforderung Risikomanagement. Identifikation, Bewertung und Steuerung industrieller Risiken. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 3–31.

Horneber, Markus (1995): Innovatives Entsorgungsmanagement. Methoden und Instrumente zur Vermeidung und Bewältigung von Umweltbelastungsproblemen. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Göttingen: Vandenhoeck und Ruprecht (Innovative Unternehmensführung, 24).

Horváth, Péter (2011): Controlling. 12. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).

Huth, Michael; Romeike, Frank (2016): Einleitung. In: Michael Huth und Frank Romeike (Hg.): Risikomanagement in der Logistik. Konzepte - Instrumente - Anwendungsbeispiele. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer, S. 3–12.

Jazdi, Nasser; Maga, Camelia; Göhner, Peter; Ehben, Thomas; Tetzner, Thilo; Löwen, Ulrich (2010): Mehr Systematik für den Anlagenbau und das industrielle Lösungsgeschäft — Gesteigerte Effizienz durch Domain Engineering. In: *at - Automatisierungstechnik* 58 (9), S. 524–532. DOI: 10.1524/auto.2010.0867.

Jodin, Dirk; Mayer, Andreas (2004): Automatisierte Methoden und Systeme der Datenerhebung. Teilprojekt M9. In: Modellierung großer Netze in der Logistik. TU Dortmund (Sonderforschungsbereich, 559).

Kaack, Jörn (2012): Performance Measurement für die Unternehmenssicherheit. Entwurf eines Kennzahlen- und Indikatorensystems und die prozessorientierte Implementierung. Dissertation Private Universität-Witten/Herdecke, 2011. Wiesbaden: Gabler.

Kaiser, Bernhard; Liggesmeyer, Peter; Mäckel, Oliver (2004): A New Component Concept for Fault Trees. In: Peter Lindsay und Tony Cant (Hg.): Proceedings of the 8th

Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software. Canberra, October. Australian Workshop on Safety Critical Systems and Software: Australian Computer Society (Conferences in research and practice in information technology, 33), S. 37–46.

Kamiske, Gerd F. (2015): Handbuch QM-Methoden. Die richtige Methode auswählen und erfolgreich umsetzen. 2. Aufl. München: Hanser.

Kamiske, Gerd F.; Brauer, Jörg-Peter (2011): Qualitätsmanagement von A bis Z. Erläuterungen moderner Begriffe des Qualitätsmanagements. 7. Aufl. München: Hanser.

Keitsch, Detlef (2004): Risikomanagement. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Praxis Creditreform).

Kempe, Thomas (2004): Management wetterinduzierter Risiken in der Energiewirtschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Schriften zum europäischen Management).

Kiefer, Jens (2007): Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. Dissertation Universität des Saarlandes. Saarbrücken: LFT, Lehrstuhl für Fertigungstechnik/CAM, Univ. des Saarlandes (Schriftenreihe Produktionstechnik, 43).

Kluge, Friedrich; Seebold, Elmar (2002): Etymologisches Wörterbuch der deutschen Sprache. 24. Aufl. Berlin, New York: De Gruyter Oldenbourg.

Knight, Frank Hyneman (1964): Risk, Uncertainty and Profit. Reprint. New York: Kelly.

Koch, Karl-Rudolf (2000): Einführung in die Bayes-Statistik. Berlin, Heidelberg: Springer.

König, Roland (2008): Management betrieblicher Risiken bei produzierenden Unternehmen. Dissertation RWTH Aachen.

Königs, Hans-Peter (2013): IT-Risikomanagement mit System. Praxisorientiertes Management von Informationssicherheits- und IT-Risiken. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer (Edition <kes>).

Krallmann, Hermann; Bobrik, Annette; Levina, Olga (2013): Systemanalyse im Unternehmen. Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik. München: De Gruyter Oldenbourg.

Kropik, Markus (2009): Produktionsleitsysteme in der Automobilfertigung. Berlin, Heidelberg: Springer.

- Kuhn, Axel (2002): Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Ergebnisbericht der Untersuchung "fast ramp up". Unter Mitarbeit von Hans-Peter Wiendahl, Walter Eversheim und Günther Schuh. Dortmund: Verlag Praxiswissen.
- Kupsch, Peter U. (1973): Das Risiko im Entscheidungsprozeß. Wiesbaden, s.l.: Gabler (Die Betriebswirtschaft in Forschung und Praxis, 14).
- Kutzbora, Rommy (2015): Entwickeln eines Konzepts zum präventiven Identifizieren von Fehlerpotentialen während des Anlaufs teil-/automatisierter Großbetriebmittel in der Automobilmontage. Masterarbeit Fachhochschule Jena.
- Landschoof, Wolf-Rüdiger (2015): FMEA-Risikoanalyse mittels Risikokubus. 10. Osnabrücker FMEA Forum. Dietz Consultants. Osnabrück, 25.02.2015.
- Lange, Knut Werner; Wall, Friederike (2001): Risikomanagement nach dem KonTraG. Aufgaben und Chancen aus betriebswirtschaftlicher und juristischer Sicht. München: Vahlen.
- Laucht, Oliver (1995): Flexibilisierung der manuellen Großmontage. Dissertation Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan-Verl. (Schriftenreihe des IWF).
- Lauenroth, Kim; Schreiber, Felix; Schreiber, Fabian (2016): Maschinen- und Anlagenbau im digitalen Zeitalter. Requirements Engineering als systematische Gestaltungskompetenz für die Fertigungsindustrie Industrie 4.0. 1. Aufl. s.l.: Beuth Verlag GmbH (Beuth Innovation).
- Lauritzen, Steffen; Spiegelhalter, David John (1988): Local Computations with Probabilities on Graphical Structures and Their Application to Expert Systems. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 50 (2), S. 157–224.
- Liggesmeyer, Peter; Trapp, Mario (2017): Safety in der Industrie 4.0. In: Birgit Vogel-Heuser, Thomas Bauernhansl und Michael ten Hompel (Hg.): Handbuch Industrie 4.0. 1. Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik), S. 107–123.
- Lindemann, Udo; Maurer, Maik; Braun, Thomas (2009): Structural Complexity Management. An Approach for the Field of Product Design. Berlin Heidelberg: Springer.
- Linß, Gerhard (2005): Qualitätsmanagement für Ingenieure. 2. Aufl. München: Hanser.
- Lotter, Bruno (2012): Einführung. In: Bruno Lotter und Hans-Peter Wiendahl (Hg.): Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch), S. 1–8.

Luce, Alexander (2018): Konzeption eines flexiblen Bauteilgreifsystems für Anbauteile in der Automobilen Endmontage. Masterarbeit Technische Universität Braunschweig.

Lück, Wolfgang (2000): Managementrisiken. In: Dietrich Dörner, Péter Horváth und Henning Kagermann (Hg.): Praxis des Risikomanagements. Grundlagen, Kategorien, branchenspezifische und strukturelle Aspekte. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 311–343.

Lüder, Arndt; Foehr, Lorenz; Hundt, Matthias; Wagner, T.; Zaddach, Jorgos-Johannes; Holm, Timo (2010): Manufacturing system engineering with mechatronical units. In: IEEE 15th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Bilbao, 13-16 September. IEEE Industrial Electronics Society.

Lüder, Arndt; Foehr, Matthias; Hundt, Lorenz; Hoffmann, Martin; Langer, Yvonne; Frank, Stefanie (2011): Aggregation of engineering processes regarding the mechatronic approach. In: IEEE 16th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Toulouse, 5-9 September. IEEE Industrial Electronics Society.

Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole; Hell, Kristofer; Röpke, Hannes; Zawisza, Jacek (2017a): Description Means for Information Artifacts Throughout the Life Cycle of CPPS. In: Stefan Biffel, Arndt Lüder und Detlef Gerhard (Hg.): Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects. 1. Aufl. Cham: Springer, S. 169–183.

Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole; Hell, Kristofer; Röpke, Hannes; Zawisza, Jacek (2017b): Fundamentals of Artifact Reuse in CPPS. In: Stefan Biffel, Arndt Lüder und Detlef Gerhard (Hg.): Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects. 1. Aufl. Cham: Springer, S. 113–138.

Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole; Hell, Kristofer; Röpke, Hannes; Zawisza, Jacek (2017c): Identification of Artifacts in Life Cycle Phases of CPPS. In: Stefan Biffel, Arndt Lüder und Detlef Gerhard (Hg.): Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems. Data Models and Software Solutions for Handling Complex Engineering Projects. 1. Aufl. Cham: Springer, S. 139–167.

Lüder, Arndt; Vogel-Heuser, Birgit; Göhner, Peter (2018): Elektronische Datenverarbeitung – Agentenbasiertes Steuern. In: Karl-Heinrich Grote, Beate Bender und Dietmar Göhlich (Hg.): Dubbel. 25. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer, S. Y35-Y39.

Lutz, Ulrich; Klaproth, Thomas (2004): Risikomanagement im Immobilienbereich. Technische und wirtschaftliche Risiken. Berlin: Springer.

- Maga, Camelia Rodica (2013): Adaptierbares Wiederverwendungskonzept für die Entwicklung von automatisierten Systemen. Dissertation Universität Stuttgart. 1. Aufl. Aachen: Shaker (IAS-Forschungsberichte, 2013,4).
- Maier, Kurt M. (2007): Risikomanagement im Immobilien- und Finanzwesen. Ein Leitfa- den für Theorie und Praxis. 3. Aufl. Frankfurt am Main: Knapp.
- Martin, Thomas A.; Bär, Thomas (2002): Grundzüge des Risikomanagements nach Kon- traG. Das Risikomanagementsystem zur Krisenfrüherkennung nach [section] 91 Abs. 2 AktG. München [u.a.]: Oldenbourg (Managementwissen für Studium und Praxis).
- Meling, Fabian (2013): Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik. Dissertation Universität München. München: Utz (Forschungsberichte IWB, 279).
- Meyer, Thierry; Reniers, Genserik L. L. (2013): Engineering risk management. Berlin, Boston: De Gruyter Oldenbourg (De Gruyter graduate).
- Mikus, Barbara (2001): Risiken und Risikomanagement - ein Überblick. In: Uwe Götze, Klaus Henselmann und Barbara Mikus (Hg.): Risikomanagement. Unter Mitarbeit von Barbara Mikus. Heidelberg: Physica-Verlag HD (Beiträge zur Unternehmensplanung), S. 3–28.
- Möller, Klaus; Stirzel, Martin (2008): Kostenmanagement im Anlauf - Aufgaben und In- strumente. In: Günther Schuh, Wolfgang Stölzle und Frank Straube (Hg.): Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen. Ein Leitfaden für die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch), S. 243–262.
- Müller, Egon; Engelmann, Jörg; Löffler, Thomas; Jörg, Strauch (2013): Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Nagarajan, Radhakrishnan; Scutari, Marco; Lèbre, Sophie (2013): Bayesian Networks in R. With Applications in Systems Biology. New York, NY: Springer (Use R!, 48).
- Nagel, Jörg (2011): Risikoorientiertes Anlaufmanagement. Dissertation Technische Uni- versität Cottbus. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Beiträge zur Produktionswirtschaft).
- Neudörfer, Alfred (2013): Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie. 5. Aufl. Berlin, Heidel- berg: Springer (VDI-Buch).
- Nyhuis, Peter (Hg.) (2008): Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: TEWISS.

Oracle: Crystal Ball. Software.

Pearl, Judea (1988): Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems. Networks of Plausible Inference. 2. Aufl. San Diego: Morgan Kaufmann; Elsevier Science & Technology Books (Representation and Reasoning).

Pearl, Judea (2013): Causality. Models, reasoning, and inference. Second edition, reprinted with corrections. New York, NY: Cambridge University Press.

Pechtl, Andreas (2003): Ein Rückblick: Risikomanagement von der Antike bis heute. In: Frank Romeike (Hg.): Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel; Methoden, Beispiele, Checklisten. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 15–41.

Pfeifer, Tilo; Schmitt, Robert (2008): Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 4. Aufl. München: Hanser.

Pfenning, Michael (2000): Shareholder value durch unternehmensweites Risikomanagement. In: Lutz Johanning und Bernd Rudolph (Hg.): Risikomanagement in Banken, Asset Management-Gesellschaften, Versicherungs- und Industrieunternehmen. Bad Soden/Ts.: Uhlenbruch (Handbuch Risikomanagement, 2), S. 1295–1332.

Pfrommer, Julius; Schleipen, Miriam; Beyerer, Jürgen (2013): PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In: IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Cagliari, 10-13 September. IEEE Industrial Electronics Society.

Piaz, Jean-Marc (2002): Operational risk Management bei Banken. Zürich: Versus.

Pischon, Alexander; Liesegang, Dietfried G. (1999): Integrierte Managementsysteme für Qualität, Umweltschutz und Arbeitssicherheit. Dissertation Universität Heidelberg. Berlin: Springer.

Pohl, Johannes (2013): Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen. Dissertation Technische Universität München. München: Herbert Utz (Forschungsberichte IWB, 284).

Porter, Michael E. (1980): Competitive strategy. Techniques for analyzing industries and competitors. 52. Aufl. New York: Free Press.

Project Management Institute (2013): A guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK guide). 5. Aufl. Newtown Square, Pennsylvania: Project Management Institute.

Proske, Dirk (2004): Katalog der Risiken. Risiken und Ihre Darstellung. 1. Aufl. Dresden: Eigenverl. Proske.

Ramussen, Norman C. (1975): Reactor safety study. An assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants. Executive summary: main report. Nuclear Regulatory Commission (WASH-1400 (NUREG-75/014)).

Rauschenbach, Matthias (2017): Probabilistische Grundlage zur Darstellung integraler Mehrzustands-Fehlermodelle komplexer technischer Systeme. Dissertation Technische Universität Darmstadt. Darmstadt.

REFA (1993): Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung. 1. Aufl. München: Hanser (REFA-Fachbuchreihe Betriebsorganisation).

Reichwald, Ralf; Piller, Frank (2009): Interaktive Wertschöpfung. Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler.

Reiss, Manuela; Reiss, Georg (2014): Praxisbuch IT-Dokumentation. Vom Betriebshandbuch bis zum Dokumentationsmanagement – die Dokumentation im Griff. München: Hanser.

Rolfes, Bernd; Kirmße, Stefan (2000): Risikomanagement in Banken. In: Dietrich Dörner, Péter Horváth und Henning Kagermann (Hg.): Praxis des Risikomanagements. Grundlagen, Kategorien, branchenspezifische und strukturelle Aspekte. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 623–668.

Romeike, Frank (2003a): Bewertung und Aggregation von Risiken. In: Frank Romeike (Hg.): Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel; Methoden, Beispiele, Checklisten. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 183–198.

Romeike, Frank (2003b): Der Prozess des strategischen und operativen Risiko Managements. In: Frank Romeike (Hg.): Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel; Methoden, Beispiele, Checklisten. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 147–164.

Romeike, Frank (2003c): Risikoidentifikation und Risikokategorien. In: Frank Romeike (Hg.): Erfolgsfaktor Risiko-Management. Chance für Industrie und Handel; Methoden, Beispiele, Checklisten. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, S. 165–181.

Romeike, Frank (2005): Modernes Risikomanagement. Die Markt-, Kredit- und operativen Risiken zukunftsorientiert steuern. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag.

Romeike, Frank (2018): Risikomanagement. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Romeike, Frank; Spitzner, Jan (2013): Von Szenarioanalyse bis Wargaming. Betriebswirtschaftliche Simulationen im Praxiseinsatz. 1. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH-Verlag.

Rommelfanger, Heinrich (2008): Stand der Wissenschaft bei der Aggregation von Risiken. In: Deutsche Gesellschaft für Risikomanagement e.V. (Hg.): Risikoaggregation in der Praxis. Beispiele und Verfahren aus dem Risikomanagement von Unternehmen. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 15–47.

Röpke, Hannes; Hell, Kristofer; Zawisza, Jacek; Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole (2016): Identification of “Industrie 4.0” component hierarchy layers. In: IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA). Berlin, 6-9 September. IEEE Industrial Electronics Society.

Röpke, Hannes; Schuetze, Oliver; Lüder, Arndt (2015): Objektivierung der Prozess - FMEA durch den Einsatz eines Risikokubus. In: Smart, effizient, mobil. 12. Magdeburger Maschinenbau-Tage. Magdeburg, 30 September - 1 Oktober. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Ropohl, Günter (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik. 3. Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe.

Rottke, Johannes; Grote, Florian; Fröhlich, Holger; Köster, Dirk; Strube, Jochen (2012): Efficient Engineering by Modularization into Package Units. In: *Chemie Ingenieur Technik* 84 (6), S. 885–991. DOI: 10.1002/cite.201200029.

Sauerwein, Elmar; Thurner, Matthias (1998): Der Risiko-Management-Prozess im Überblick. In: Hans H. Hinterhuber, Elmar Sauerwein und Christine Fohler-Norek (Hg.): Betriebliches Risikomanagement. Wien, Berlin: Verleger Österreich; Berliner Wissenschafts-Verlag, S. 19–39.

Schenk, Michael; Wirth, Siegfried; Müller, Egon (2014): Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (VDI-Buch).

Scherpereel, Peter (2006): Risikokapitalallokation in dezentral organisierten Unternehmen. Dissertation Universität Köln. 1. Aufl. s.l.: Deutscher Universitätsverlag (Quantitatives Controlling).

Schierenbeck, Henner (2006): Risiko-Controlling und integrierte Rendite-/Risikosteuerung. 8. Aufl. Wiesbaden: Gabler (Ertragsorientiertes Bankmanagement, 2).

Schild, Ulrich (2005): Lebenszyklusrechnung und lebenszyklusbezogenes Zielkostenmanagement. Stellung im internen Rechnungswesen, Rechnungsausgestaltung und modellgestützte Optimierung der intertemporalen Kostenstruktur. Dissertation Universität Göttingen. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag.

Schleipen, Miriam (2013): Adaptivität und semantische Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen. Dissertation Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe, Hannover: KIT Scientific Publishing (Karlsruher Schriften zur Anthropomatik, 12).

Schlickenrieder, Magdalena (2016): Modell für die Rahmenbedingungen eines differenzierten Risikomanagementansatzes für Einbahninfrastrukturprojekte mit Fokus auf die Planungsphasen bis zur Vergabe. Dissertation Technische Universität Graz. Graz.

Schmidt, Nicole (2018): Recovery planning method for production systems. Dissertation Universität Magdeburg. Magdeburg.

Schmidt, Nicole; Lüder, Arndt; Hell, Kristofer; Röpke, Hannes; Zawisza, Jacek (2016): A generic model for the end-of-life phase of production systems. In: IEEE 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Florence, 24-27 October. IEEE Industrial Electronics Society.

Schmidt, Nicole; Lüder, Arndt; Rosendahl, Ronald; Ryashentseva, Daria; Foehr, Matthias; Vollmar, Jan (2015): Characterizing integration approaches: Identifying integration approach candidates for use in industrie 4.0. In: IEEE 13th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). Cambridge, 22-24 July. IEEE Industrial Electronics Society, S. 527–532.

Schmitz, Bernhard (2007): Wetterderivate als Instrument im Risikomanagement landwirtschaftlicher Betriebe. Dissertation Universität Bonn. Bonn.

Schneeweiß, Christoph (1991): Planung. Systemanalytische und entscheidungstheoretische Grundlagen. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).

Scholten, Bianca (2007): The road to integration. A guide to applying the ISA-95 standard in manufacturing. Research Triangle Park, NC: ISA.

Schröck, Sebastian (2016): Interdisziplinäre Wiederverwendung im Engineering automatisierter Anlagen. -Anforderungen, Konzept und Umsetzungen für die Prozessindustrie -. Dissertation Helmut-Schmidt-Universität Hamburg. Hamburg.

Schröder, Regina Wencke (2005): Risikoaggregation unter Beachtung der Abhängigkeiten zwischen Risiken. Dissertation Universität Witten/Herdecke. 1. Aufl. Baden-Baden: Nomos.

Schuh, Günther (2012): Innovationsmanagement. Handbuch Produktion und Management 3. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

Schuh, Günther; Westkämper, Engelbert (2006): Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau. Stand, Potenziale, Trends. RWTH, Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR). Aachen.

Schuppisser, Hans Rudolf (1978): Die Gestaltung der Investitionsentscheidung unter Berücksichtigung des Risikos. Dissertation Universität Zürich. Bern: Haupt (Schriftenreihe des Instituts für Betriebswirtschaftliche Forschung an der Universität Zürich, 25).

Schwaiger, Roland (2008): Sprachen und Standards für Ist- und Soll -Prozessbeschreibungen im betrieblichen Umfeld. Books on Demand GmbH: Norderstedt.

Schwaninger, Markus (1994): Managementsysteme. Frankfurt/Main: Campus (St. Galler Management-Konzept, 4).

Seifert, Bennet (2016): Konzipierung einer Methode zur Verbesserung der Wiederverwendbarkeit von Betriebsmitteln in der Montageplanung bei Volkswagen. Bachelorarbeit Hochschule Ostfalia.

Seiffert, Helmut (2003): Einführung in die Wissenschaftstheorie. 13. Aufl. München: Beck (Beck'sche Reihe, 1).

Siepermann, Markus (2008): Risikokostenrechnung. Erfolgreiche Informationsversorgung und Risikoprävention. Berlin: Erich Schmidt Verlag (Management und Wirtschaft Studien, 70).

Starp, Michael (2005): Integriertes Risikomanagement im landwirtschaftlichen Betrieb. Dissertation Universität Bonn. Berlin: Duncker & Humblot (Betriebswirtschaftliche Schriften, 166).

Steiger, Markus (2009): IT-gestütztes Risikomanagementmodell für Tunnelbauprojekte mit Hilfe von Bayes'schen Netzen und Monte-Carlo-Simulationen. Dissertation Technische Hochschule ETH Zürich.

Strathmann, Carsten (2016): Evaluierung der Einflüsse von Produktmerkmalen auf standardisierte Prozesse und Betriebsmittel am Beispiel von Dachsystemen. Masterarbeit Hochschule Ostfalia.

Ulrich, Hans; Dyllick, Thomas; Probst, Gilbert (1984): Management. Bern: Haupt (Schriftenreihe Unternehmung und Unternehmungsführung, 13).

Umlauf, Konrad; Gradmann, Stefan (2012): Handbuch Bibliothek. Geschichte, Aufgaben, Perspektiven. Stuttgart, Weimar: Verlag J.B. Metzler.

VDI/VDE (2015): Status Report: Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). Online verfügbar unter https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/GMA_Status_Report__Reference_Architecture_Model__Industrie_4.0__RAMI_4.0_/GMA-Status-Report-RAMI-40-July-2015.pdf, zuletzt aktualisiert am 09.02.2019.

Vetter, Hermann (1967): Wahrscheinlichkeit und logischer Spielraum. Eine Untersuchung zur induktiven Logik. Tübingen: Mohr Verlag.

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (Hg.) (2017a): Handbuch Industrie 4.0. 1. Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg (Springer Reference Technik).

Vogel-Heuser, Birgit; Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten (2017b): Handbuch Industrie 4.0. 4. Allgemeine Grundlagen. 2. Aufl.: Springer Vieweg (Springer Reference Technik).

Vogel-Heuser, Birgit; Fuchs, Julia; Feldmann, Stefan; Legat, Christoph (2015): Interdisziplinärer Produktlinienansatz zur Steigerung der Wiederverwendung. In: *at - Automatisierungstechnik* 63 (2), S. 99–110. DOI: 10.1515/auto-2014-1140.

Voigt, Kai-Ingo (2010): Risikomanagement im industriellen Anlagenbau. Konzepte und Fallstudien aus der Praxis. Berlin: Schmidt.

Waas, Michael (2005): Wagnis Mensch im M&A-Prozess. Eine verhaltenstheoretische Risikoanalyse. Dissertation Universität der Bundeswehr München. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag (Internationalisierung und Management).

Walzl, Hubert; Wildemann, Horst (2015): Modularisierung der Produktion in der Automobilindustrie. 2. Aufl. München: TCW (TCW, 30).

Wasserzieher, Ernst (1974): Woher? Ableitendes Wörterbuch der deutschen Sprache. 18. Aufl. Bonn: Bildungsverlag Eins.

Weber, Klaus H. (2006): Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen. Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen. 3. Aufl. Berlin: Springer (VDI-Buch).

Weilkiens, Tim (2014): Systems Engineering mit SysML/UML. Anforderungen, Analyse, Architektur. 3. Aufl. Heidelberg: dpunkt.

Werdich, Martin (2012): FMEA - Einführung und Moderation. Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Westkämper, Engelbert; Balve, Patrick (2003): Technologiemanagement in produzierenden Unternehmen. In: Hans-Jörg Bullinger, Hans Jürgen Warnecke und Engelbert Westkämper (Hg.): Neue Organisationsformen im Unternehmen. Ein Handbuch für das moderne Management. 2. Aufl. Berlin, Heidelberg, s.l.: Springer (VDI-Buch), S. 274–289.

Westkämper, Engelbert; Zahn, Erich (2009): Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin, Heidelberg: Springer.

Weyrich, Michael; Klein, Philipp (2012): Engineering of automated manufacturing systems with mechatronic objects. In: IEEE 38th annual conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON). Montreal, 25-28 October. IEEE Industrial Electronics Society.

Wiedemann, Arnd (1998): Die Passivseite als Erfolgsquelle. Zinsmanagement in Unternehmen. Dissertation Universität Basel. Wiesbaden: Gabler.

Wiendahl, Hans-Peter (2010): Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser.

Wiendahl, Hans-Peter; ElMaraghy, Hoda; Nyhuis, Peter; Zäh, Michael; Wiendahl, Hans-Hermann; Duffie, Neil; Brieke, Michael (2007): Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In: *CIRP Annals* 56 (2), S. 783–809. DOI: 10.1016/j.cirp.2007.10.003.

Wiendahl, Hans-Peter; Hegenscheidt, Mathias; Winkler, Helge (2002): Anlaufrobuste Produktionssysteme. Ramp-up-sturdy production systems. In: *wt Werkstatttechnik online* 92 (11/12), S. 650–655.

Wiendahl, Hans-Peter; Reichardt, Jürgen; Nyhuis, Peter (2014): Handbuch Fabrikplanung. Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten. 2. Aufl. München: Hanser.

Wiggert, Marcel (2009): Risikomanagement von Betreiber- und Konzessionsmodellen. Dissertation TU Graz. 1. Aufl. Graz: TU Graz (Schriftenreihe des Instituts für Baubetrieb und Bauwirtschaft, H. 29).

- Wildemann, Horst (2008): Anlaufmanagement. Leitfaden zur Optimierung der Anlaufphase von Produkten, Anlagen und Dienstleistungen. 6. Aufl. München: TCW (Leitfaden / TCW, Transfer-Centrum für Produktions-Logistik und Technologie-Management, 76).
- Winter, Peter (2007): Risikocontrolling in Nicht-Finanzunternehmen. Dissertation Universität Mannheim. Lohmar: Josef Eul (Controlling, 5).
- Winz, Gerald (2016): Qualitätsmanagement für Wirtschaftsingenieure. Qualitätsmethoden, Projektplanung, Kommunikation. München: Hanser.
- Wißler, Frank Eugen (2006): Ein Verfahren zur Bewertung technischer Risiken in der Phase der Entwicklung komplexer Serienprodukte. Dissertation Universität Stuttgart. Heimsheim, Stuttgart: Jost-Jetter (IPA-IAO-Forschung und -Praxis, 437).
- Wittmann, Edgar (2006): Organisation des Risikomanagements im Siemens Konzern. In: Henner Schierenbeck (Hg.): Risk Controlling in der Praxis. Rechtliche Rahmenbedingungen und geschäftspolitische Konzeptionen in Banken, Versicherungen und Industrie. 2. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel (Finanzbetrieb), S. 457–482.
- Wittmann, Waldemar (1959): Unternehmung und Unvollkommene Information. Unternehmerische Voraussicht - Ungewißheit und Planung. 1. Aufl. Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Wöhe, Günter; Döring, Ulrich (2002): Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 21. Aufl. München: Vahlen (Vahlens Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften).
- Wolf, Elke (2005): IS Risks and Operational Risk Management in Banks. Dissertation Universität Köln. Lohmar: Josef Eul (Wirtschaftsinformatik, 47).
- Wolff, M.; Gillich, U.; Bosch, E.; Gruhle, W.-D.; Knoblach, J. (2003): Softwareplattform und standardisierte Schnittstellen - Voraussetzungen fuer ReUse, Qualitaet und verteilte Systeme. In: VDI (Hg.): 11. Internationale Tagung Elektronik im Kraftfahrzeug. Baden-Baden, 25-26 September. VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 1789), S. 941–955.
- Wolke, Thomas (2008): Risikomanagement. 2. Aufl. München [u.a.]: De Gruyter Oldenbourg.
- Wördenweber, Burkard; Wickord, Wiro (2001): Chance oder Risiko? Erfolgreiche Technologieentwicklung mit Innovationsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer (VDI-Buch).

Wossidlo, Peter Rütger (1970): Unternehmenswirtschaftliche Reservierung: Eine realtheoretische und praxeologische Untersuchung. 1. Aufl. Berlin: Duncker & Humblot.

Wübbenhorst, Klaus (1992): Lebenszykluskosten. In: Christof Schulte (Hg.): Effektives Kostenmanagement. Methoden und Implementierung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel, S. 245–272.

Zawisza, Jacek; Hell, Kristoffer; Röpke, Hannes; Lüder, Arndt; Schmidt, Nicole (2016): Generische Strukturierung von Produktinossystemen der Fertigungsindustrie. In: VDI (Hg.): 17. Branchentreff der Mess- und Automatisierungstechnik (Automation). Baden-Baden, 7-8 Juni. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik. Düsseldorf: VDI Verlag (VDI-Berichte, 2284), S. 125–127.

Zehbold, Cornelia (1996): Lebenszykluskostenrechnung. Dissertation Universität Erlangen-Nürnberg. Wiesbaden: Gabler (krp Edition).

Ziegenbein, Arne (2007): Supply-Chain-Risiken. Identifikation, Bewertung und Steuerung. Dissertation ETH Zürich. Zürich: vdf, Hochsch.-Verl. ETH (vdf Wirtschaft, 15).

Zimmermann, Hans-Jürgen; Gutsche, Lothar (1991): Multi-Criteria Analyse. Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen. Berlin, Heidelberg: Springer (Heidelberger Lehrtexte Wirtschaftswissenschaften).

Zuber, Pascal (2009): Innovationsmanagement in der Biotechnologie. Nachhaltigkeit als Leitbild einer entwicklungsbegleitenden Evaluierung. Dissertation Universität Mainz. Wiesbaden: Gabler (Forum Produkt und Produktionsmanagement).

12.1 Normen

AS/NZS 4360, 2004: Risk Management.

DIN 6789-6, 1998: Dokumentationssystematik - Teil 6: Verfälschungssicherheit digitaler technischer Dokumentation [zurückgezogen].

DIN 8580, 2003: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.

DIN 8593-0, 2003: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.

DIN EN 31010, 2010: Risikomanagement - Verfahren zur Risikobeurteilung.

DIN EN 60300-3-3, 2015: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten.

DIN EN 60812, 2006: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA).

DIN EN 62264-1, 2014: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie.

DIN EN 81346-1, 2010: Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte - Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnung - Teil 1: Allgemeine Regeln.

DIN EN ISO 10218-1, 2012: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter.

DIN EN ISO 12100, 2011: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung.

DIN EN ISO 9000, 2015: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.

DIN EN ISO 9001, 2015: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen.

DIN IEC 60050-351, 2014: Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik.

DIN ISO 31000, 2011: Risikomanagement - Grundsätze und Leitlinien [zurückgezogen] (Entwurf).

DIN ISO 31000, 2018: Risikomanagement - Leitlinien.

DIN SPEC 91345, 2016: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0).

EN ISO 12100, 2010: Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung.

IATF 16949, 2016: Qualitätsmanagement - System-Standard der Automobilindustrie - Anforderungen an Qualitätsmanagementsysteme für die Serien- und Ersatzteilproduktion in der Automobilindustrie.

ISO 5807, 1985: Informationsverarbeitung; Dokumentationssymbole und -konventionen für Daten, für Programm- und Systemabläufe, für Pläne von Programmnetzen und Systemhilfsquellen.

NA 035, 2003: Abwicklung von PLT-Projekten.

VDI 2206, 2004: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme.

VDI 2221, 1993: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

VDI 2243, 2002: Recyclingorientierte Produktentwicklung.

VDI/VDE 2422, 1994: Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik [zurückgezogen].

VDI 2860, 1990: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.

VDI 2884, 2005: Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC).

VDI/VDE 3542-1, 2000: Sicherheitstechnische Begriffe für Automatisierungssysteme - Qualitative Begriffe.

VDI/VDE 3695-1, 2010: Engineering von Anlagen - Evaluieren und optimieren des Engineerings - Grundlagen und Vorgehensweise.

VDI/VDE 3695-2, 2010: Engineering von Anlagen - Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Prozesse.

VDI/VDE 3695-3, 2010: Engineering von Anlagen - Evaluieren und optimieren des Engineerings - Themenfeld Methoden.

VDI 4008-6, 1999: Monte-Carlo-Simulation.

VDI 4499-1, 2008: Digitale Fabrik - Grundlagen.

VDI 4499-2, 2011: Digitale Fabrik - Digitaler Fabrikbetrieb.

VDI 5200-1, 2011: Fabrikplanung - Planungsvorgehen.

VDMA 34160, 2006: Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen.

VDA 4-2, 2012: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Sicherung der Qualität in der Prozesslandschaft - Allgemeines, Risikoanalysen, Methoden, Vorgehensmodelle.

VDA 6-1, 2016: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie Teil 1: QM-Systemaudit Serienproduktion.

VDA 14, 2008: Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Präventive Qualitätsmanagement-Methoden in der Prozesslandschaft.

A. Anhang Struktur Einbau-Dachsystem-Anlage

Table with 10 columns: Fertigungnetzwerk, Fabrik, Fertigungsline, Fertigungsabschnitt, Arbeitseinheit, Arbeitsstation, Funktionsgruppe, Komponente, Produktionsressource, and Konstruktionselement. The table details the manufacturing structure of a roof system installation, including resources like 'Fertigung Wolfsburg' and 'Lack', functional groups like 'Handhabung (Aufnahme, Bewegen, Ablegen)', and various production processes and components.

B. Anhang: Allgemeine Projektkennzahlen A_i - Fallbeispiel

Merkmalssträger	Num-mer	Kurztext	numerische Ausprägung	Einheit
Projektkostenplan des aktuellen Projekts	$A1$	Plankosten des Betriebsmittelprojekts - interne Kosten	50.000,00	€
	$A2$	Plankosten des Betriebsmittelprojekts - externe Kosten	800.000,00	
	$A3$	Plangesamtkosten des Betriebsmittelprojekts	850.000,00	
Finanzdaten abgeschlossener Projekte	$A4$	Durchschnittliche relative Projektkostenüberschreitungen	10,00	%
	$A5$	Projektkostenüberschreitungen (Anteil Nachforderungen)	55,00	
	$A6$	Projektkostenüberschreitungen (Anteil Anlaufbegleitung)	10,00	
	$A7$	Projektkostenüberschreitungen (Anteil Nacharbeit)	5,00	
	$A8$	Projektkostenüberschreitungen (Anteil Ausschuss)	0,00	
Projektterminplan des aktuellen Projekts	$A9$	Projektkostenüberschreitungen (Anteil Stillstand)	30,00	KW
	$A10$	Plandauer des Betriebsmittelprojekts	36	
Projektterminplan des aktuellen Projekts	$A11$	Durchschnittliche relative Projektterminüberschreitungen	5,00%	%
Projektterminplan des aktuellen Projekts	$A12$	Projektterminüberschreitungen (Anteil Nachforderungen)	100,00%	%
	$A13$	Projektterminüberschreitungen (Anteil Anlaufbegleitung)	0,00%	
	$A14$	Projektterminüberschreitungen (Anteil Nacharbeit)	0,00%	
	$A15$	Projektterminüberschreitungen (Anteil Ausschuss)	0,00%	
	$A16$	Projektterminüberschreitungen (Anteil Stillstand)	0,00%	

C. Anhang: Globale Projektkennzahlen *B_i*- Fallbeispiel

PR	Merkmals-träger	Kennzahl		Kenn-zahl-wert	Wich-tung	Gewichteter Kennzahl-wert
		Nr.	Benennung			
PR1	Betriebs-mittel	<i>B1</i>	Modifikationsumfang	3	0,8	2,80
		<i>B2</i>	Komplexitätsgrad	2	0,2	
	Werksum-gebung	<i>B3</i>	Abweichung Hallen- struktur	2	0,3	2,00
		<i>B4</i>	Abweichung Logistik	2	0,15	
		<i>B5</i>	Abweichung Medien- versorgung	2	0,3	
		<i>B6</i>	Abweichung Förder- technik	2	0,1	
		<i>B7</i>	Abweichung Informati- onsfluss	2	0,15	
	Produkt/ Bauteil	<i>B8</i>	Abweichung Bauteilmateri- al	1	0,2	1,80
		<i>B9</i>	Abweichung Bauteilge- wicht	2	0,2	
		<i>B10</i>	Abweichung Bauteilge- ometrie	2	0,2	
		<i>B11</i>	Abweichung Montage- konzept	2	0,2	
		<i>B12</i>	Abweichung Varianten- anzahl	2	0,2	
	Lieferant	<i>B13</i>	Grad der technischen Expertise	3	0,5	2,50
		<i>B14</i>	Grad der Kundenkom- petenz	2	0,5	
PR2	PR1	<i>B1 - B14</i>	Arithmetisches Mittel der gewichteten Kenn- zahl von PR1	2,00	0,7	1,40
	Betriebs- mittel	<i>B15</i>	Automatisierungsgrad	1	0,5	2,00
		<i>B16</i>	Wertschöpfungsanteil	3	0,5	
PR3 /4	PR1	<i>B1 - B14</i>	Arithmetisches Mittel der gewichteten Kenn- zahl von PR1	2,00	0,7	1,40
	Betriebs- mittel	<i>B16</i>	Wertschöpfungsanteil	2	0,5	2,50
		<i>B17</i>	Betriebsmittelreparatur- dauer	3	0,5	
PR5	PR1	<i>B1 - B14</i>	Arithmetisches Mittel der gewichteten Kenn- zahl von PR1	2,00	0,7	1,40
	Betriebs- mittel	<i>B18</i>	Güte der Notstrategie	2	0,5	2,00
		<i>B19</i>	Anlaufdauer der Not- strategie	2	0,5	

D. Anhang: Lokale Projektkennzahlen C_i - Fallbeispiel

Merkmalssträger	Nummer	Kurztext	numerische Ausprägung	Einheit
Rahmendaten des Projekts	C6	Ergebnisbeitrag - ØEB	1000	€/Fzg.
	C7	Jobs per hour - JPH	60	Fzg./h
Stellantrieb				
Fehlfunktion 1: Stellantrieb blockiert	$C1_{pneu. Antrieb}$	Auftretenswahrscheinlichkeit	5	%
	$C1_{elk. Antrieb}$	Auftretenswahrscheinlichkeit	40	
	$C2_{pneu. Antrieb}$	Entdeckungswahrscheinlichkeit	60	
	$C3_{elk. Antrieb}$	Entdeckungswahrscheinlichkeit	60	
	$C3_{pneu. Antrieb}$	Testzeitpunkt	300	d
	$C3_{elk. Antrieb}$	Testzeitpunkt	300	
	$C4$	Plankosten €	3.000	€
	$C8$	Reparaturdauer - ØT _R	1	h
	$C9$	Nacharbeitskosten - ØNK	100	€/Fzg.
Teileträger				
Fehlfunktion 1: Teileträger nicht maßhaltig	$C1_{100\% Kontrolle}$	Auftretenswahrscheinlichkeit	20	%
	$C1_{Stichprobe}$	Auftretenswahrscheinlichkeit	20	
	$C2_{100\% Kontrolle}$	Entdeckungswahrscheinlichkeit	95	
	$C2_{Stichprobe}$	Entdeckungswahrscheinlichkeit	60	
	$C3_{100\% Kontrolle}$	Testzeitpunkt	300	d
	$C3_{Stichprobe}$	Testzeitpunkt	350	
	$C4$	Plankosten	40.000	€
	$C8$	Reparaturdauer - ØT _R	0,5	h
	$C9$	Nacharbeitskosten - ØNK	100	€/Fzg.