

Produzierende Unternehmen sehen sich beim Management von Änderungen entlang des Produktentstehungsprozess mit einer Vielzahl an Herausforderungen konfrontiert. Starke Marktdynamiken und die Verkürzung von Produktlebenszyklen verschärfen diese Herausforderungen zunehmend. Vor diesem Hintergrund sowie angesichts des zunehmenden Wandels des Marktes von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt ist die effektive und effiziente Bearbeitung von technischen Änderungen heute eine Pflichtaufgabe. Dabei werden jedoch i.d.R. noch keine modernen Datenanalyseverfahren wie der Random Forest Algorithmus zur Prognose eingesetzt. Bezugnehmend auf die beschriebene Ausgangssituation war die effiziente Gestaltung des Umgangs mit technischen Änderungen das Ziel dieser Arbeit. Dazu zählen insbesondere die Auswahl der zu bearbeitenden technischen Änderungen sowie eine Minimierung der Gesamtänderungskosten durch die Bündelung von technischen Änderungen mit ähnlicher Ressourcenbeanspruchung. Die Methodik fokussierte dabei die Zuordnung technischer Änderungen mittels eines Beschreibungsmodells und die Ermittlung von Grundtypen technischer Änderungen. Weiterhin erfolgte die Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, wobei der Aufwand durch prädiktive Datenanalyse ermittelt wurde. Abschließend wurden die technischen Änderungen zur Minimierung des Gesamtänderungsaufwands gebündelt. In Kapitel 1 dieser Arbeit wurde die Motivation der Arbeit vorgestellt und daraus folgend wurde die Zielsetzung abgeleitet. In Kapitel 2 wurden die relevanten Grundlagen und Definitionen eingeführt. Hierzu wurden der Objektbereich und der Zielbereich sowie die Lösungshypothese der Arbeit entwickelt. Dabei wurde zuerst das technische Änderungsmanagement als Teil der Produktentwicklung beschrieben, um anschließend die Bedeutung technischer Änderungen hervorzuheben. In Kapitel 3 wurden Theorie- und Praxisdefizite ermittelt, um die Relevanz der Arbeit sicherzustellen. Die Erkenntnisse der ersten Kapitel wurden in Kapitel 4 genutzt, um die Methodik zu konzipieren. In Kapitel 5 folgte die Detaillierung der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Methodik wurde in Kapitel 6 eine Validierung der Methodik durchgeführt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend kritisch reflektiert und weitere Optimierungspotenziale für die Methodik wurden entwickelt.

ISBN 978-3-98555-267-2



9 783985 552672

Bewertung technischer Produktänderungen mittels prädiktiver
Datenanalyse

Michael Mendl-Heinisch



Michael Mendl-Heinisch

Bewertung technischer Produktänderungen mittels prädiktiver Datenanalyse



Bewertung technischer Produktänderungen mittels prädiktiver Datenanalyse

Evaluation of Technical Product Change by Using Predictive Analytics

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Michael Otto Mendl-Heinisch

Berichter/in:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Günther Schuh
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Boos

Tag der mündlichen Prüfung: 30. September 2024

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

ERGEBNISSE AUS DER PRODUKTIONSTECHNIK

Michael Mendl-Heinisch

Bewertung technischer Produktänderungen
mittels prädiktiver Datenanalyse

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. G. Schuh

Prof. Dr.-Ing. C. Brecher

Prof. Dr.-Ing. R. H. Schmitt

Band 7/2025



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Michael Mendl-Heinisch:

Bewertung technischer Produktänderungen mittels prädiktiver Datenanalyse

1. Auflage, 2025

Gedruckt auf holz- und säurefreiem Papier, 100% chlorfrei gebleicht.

Copyright Apprimus Verlag, Aachen, 2025

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany

ISBN 978-3-98555-267-2

Produzierende Unternehmen sehen sich beim Management von Änderungen entlang des Produktentstehungsprozess mit einer Vielzahl an Herausforderungen konfrontiert. Starke Marktdynamiken und die Verkürzung von Produktlebenszyklen verschärfen diese Herausforderungen zunehmend. Vor diesem Hintergrund sowie angesichts des zunehmenden Wandels des Marktes von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt ist die effektive und effiziente Bearbeitung von technischen Änderungen heute eine Pflichtaufgabe. Dabei werden jedoch i.d.R. noch keine modernen Datenanalyseverfahren wie der Random Forest Algorithmus zur Prognose eingesetzt. Bezugnehmend auf die beschriebene Ausgangssituation war die effiziente Gestaltung des Umgangs mit technischen Änderungen das Ziel dieser Arbeit. Dazu zählen insbesondere die Auswahl der zu bearbeitenden technischen Änderungen sowie eine Minimierung der Gesamtänderungskosten durch die Bündelung von technischen Änderungen mit ähnlicher Ressourcenbeanspruchung. Die Methodik fokussierte dabei die Zuordnung technischer Änderungen mittels eines Beschreibungsmodells und die Ermittlung von Grundtypen technischer Änderungen. Weiterhin erfolgte die Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, wobei der Aufwand durch prädiktive Datenanalyse ermittelt wurde. Abschließend wurden die technischen Änderungen zur Minimierung des Gesamtänderungsaufwands gebündelt. In Kapitel 1 dieser Arbeit wurde die Motivation der Arbeit vorgestellt und daraus folgend wurde die Zielsetzung abgeleitet. In Kapitel 2 wurden die relevanten Grundlagen und Definitionen eingeführt. Hierzu wurden der Objektbereich und der Zielbereich sowie die Lösungshypothese der Arbeit entwickelt. Dabei wurde zuerst das technische Änderungsmanagement als Teil der Produktentwicklung beschrieben, um anschließend die Bedeutung technischer Änderungen hervorzuheben. In Kapitel 3 wurden Theorie- und Praxisdefizite ermittelt, um die Relevanz der Arbeit sicherzustellen. Die Erkenntnisse der ersten Kapitel wurden in Kapitel 4 genutzt, um die Methodik zu konzipieren. In Kapitel 5 folgte die Detaillierung der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Methodik wurde in Kapitel 6 eine Validierung der Methodik durchgeführt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend kritisch reflektiert und weitere Optimierungspotenziale für die Methodik wurden entwickelt.

Manufacturing companies face a variety of challenges when managing changes along the product development process. Strong market dynamics and the shortening of product life cycles are increasingly exacerbating these challenges. Against this background and in view of the increasing transformation of the market from a seller's to a buyer's market, the effective and efficient processing of technical changes is now a mandatory task. However, modern data analysis methods such as the Random Forest Algorithm are generally not yet used for forecasting. With reference to the initial situation described above, the aim of this work was to efficiently design the handling of technical changes. This includes in particular the selection of the technical changes to be processed as well as minimizing the overall change costs by bundling technical changes with similar resource requirements. The methodology focused on the allocation of technical changes using a description model and the determination of basic types of technical changes. Furthermore, the costs and benefits of technical changes were described, whereby the costs were determined using predictive data analysis. Finally, the technical changes were bundled to minimize the overall change effort. In chapter 1 of this thesis, the motivation for the work was presented and the objectives were derived from this. Chapter 2 introduced the relevant principles and definitions. For this purpose, the object area and the target area as well as the solution hypothesis of the thesis were developed. Technical change management was first described as part of product development in order to then emphasize the importance of technical changes. In chapter 3, theoretical and practical deficits were identified in order to ensure the relevance of the work. The findings of the first chapters were used in Chapter 4 to design the methodology. Chapter 5 detailed the methodology for evaluating technical changes using predictive data analysis. To ensure the applicability of the methodology, a validation of the methodology was carried out in chapter 6. The insights gained here were then critically reviewed and further optimization potentials for the methodology were developed.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen	VII
Verzeichnis der Tabellen	XI
Verzeichnis der Abkürzungen	XIII
Verzeichnis der Formelzeichen	XV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit	4
1.3 Forschungskonzeption	6
1.4 Aufbau der Arbeit	9
2 Grundlagen	11
2.1 Produktentwicklung in produzierenden Unternehmen	11
2.1.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten	11
2.1.2 Produktentstehungsprozess und Produktentwicklung	15
2.2 Technisches Änderungsmanagement	19
2.2.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten	19
2.2.2 Änderungsprozess	22
2.2.3 Bewertung von technischen Änderungen	27
2.2.4 Dokumentation von technischen Änderungen	33

2.3	Datenanalyse.....	36
2.3.1	Definition relevanter Begrifflichkeiten.....	36
2.3.2	KDD-Prozess und CRISP-DM	38
2.3.3	Data Mining.....	41
2.4	Maschinelles Lernen als Prognoseverfahren	44
2.4.1	Definition relevanter Begrifflichkeiten.....	44
2.4.2	Kriterien zur Auswahl eines Prognosealgorithmus	46
2.4.3	Random-Forest-Algorithmus.....	50
2.5	Zwischenfazit zu den Grundlagen und Definitionen.....	56
3	Bestehende Ansätze zur Bewertung technischer Änderungen	59
3.1	Herausforderungen in der Praxis	59
3.2	Darstellung und Bewertung bestehender Ansätze zur datenbasierten Änderungsbewertung	63
3.2.1	Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze.....	63
3.2.2	Darstellung bestehender Ansätze zur datenbasierten Änderungsbewertung.....	65
3.2.3	Bewertung bestehender Ansätze und Positionierung der Arbeit.....	82
3.3	Zwischenfazit: Forschungsbedarf zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen	87
4	Konzept der Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse	89
4.1	Zielbild zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse	89
4.2	Anforderungen an die Methodik	91
4.2.1	Inhaltliche Anforderungen	91

4.2.2	Formale Anforderungen	92
4.3	Angestrebte Nutzenpotenziale der Methodik	94
4.4	Grobkonzept der Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse	95
4.4.1	Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen	97
4.4.2	Differenzierbare Grundtypen technischer Änderungen	98
4.4.3	Aufwands- und Nutzendimensionen von technischen Änderungen.....	99
4.4.4	Aufwandsabschätzung für technische Änderungen mittels Random Forest und Minimierung des Gesamtänderungsaufwands	101
4.4.5	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen.....	102
4.5	Ableitung von Teilmodellen	103
4.6	Zwischenfazit: Grobkonzept zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen.....	104
 5 Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse.....		107
5.1	Beschreibung von technischen Änderungen	107
5.1.1	Ermittlung der Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen.....	108
5.1.2	Operationalisierung der Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen.....	116
5.1.3	Zusammenfassung der operationalisierten Änderungsmerkmale.....	123
5.2	Differenzierbare Grundtypen technischer Änderungen	124
5.2.1	Exkurs: Typenbildende Verfahren	125

5.2.2	Bestimmung der typenbildenden Merkmale	128
5.2.3	Konsistenzanalyse typenbildender Merkmale	130
5.2.4	Definition der Grundtypen technischer Änderungen	134
5.3	Aufwands- und Nutzendimensionen von technischen Änderungen	144
5.3.1	Exkurs: Systemtheorie.....	144
5.3.2	Beschreibung technischer Änderungen im Sinne der Systemtheorie	146
5.3.3	Ermittlung der Änderungsaufwände je Leistungsbereich	148
5.3.4	Ermittlung der Nutzendimensionen technischer Änderungen.....	154
5.4	Aufwandsabschätzung für technische Änderungen mittels Random Forest.....	158
5.4.1	Datenvorbereitung für das Prädiktionsmodell.....	158
5.4.2	Aufbau des Prädiktionsmodells	163
5.4.3	Evaluation der Ergebnisse und Optimierung des Prädiktionsmodells.....	170
5.5	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen	172
5.5.1	Bewertung neuer technischer Änderungen	173
5.5.2	Bündelung technischer Änderungen zur Aufwandsminimierung	175
5.5.3	Ableitung einer Umsetzungsempfehlung.....	181
5.6	Zwischenfazit: Methodik zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen	184
6	Validierung und kritische Reflexion	187
6.1	Ausgangssituation der Windenergie AG	187
6.2	Anwendung der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse	188

6.2.1	Beschreibung technischer Änderungen	188
6.2.2	Ermittlung der Grundtypen.....	189
6.2.3	Aufwand und Nutzen technischer Änderungen.....	190
6.2.4	Ableitung einer Umsetzungsempfehlung.....	193
6.3	Kritische Reflexion der Anwendungserfahrung	194
7	Zusammenfassung und Ausblick	197
	Literaturverzeichnis.....	199
	Anhang	215
A.1	Suchwortdiagramm.....	215
A.2	Daten der verwendeten technischen Änderungen	216
A.3	Neue technische Änderungen	276
A.4	Algorithmus zur Ermittlung von Grundtypen.....	278
A.5	Algorithmus zum Trainieren des Prädiktionsmodells	279
A.6	Algorithmus zur Prädiktion der Änderungsaufwände	282
A.7	Algorithmus zur Minimierung des Aufwands durch Bündelung	283

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1-1: Wissenschaftssystematik	6
Abbildung 1-2: Forschungsprozess nach ULRICH ET AL.	8
Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit.....	9
Abbildung 2-1: Innovationsprozess nach SPECHT ET AL.	13
Abbildung 2-2: Produktentstehungsprozess nach EHRENSPIEL ET AL.	15
Abbildung 2-3: Produktentwicklungsprozess nach SCHUH	16
Abbildung 2-4: Produktentstehungsprozess mit begleitenden Prozessen	17
Abbildung 2-5: Darstellung der Aktionsfelder technischer Änderungen nach LINDEMANN ET AL.	20
Abbildung 2-6: Änderungsprozess nach JARRATT ET AL.	24
Abbildung 2-7: Änderungsprozess basierend auf VDA 4965	26
Abbildung 2-8: Referenzänderungsprozess nach WICKEL ET AL.	27
Abbildung 2-9: Klassifizierung von Änderungskosten nach HAMRAZ	32
Abbildung 2-10: Ausschnitt des STEP-Modells nach MEHTA	35
Abbildung 2-11: Darstellung des KDD-Prozesses	39
Abbildung 2-12: Darstellung des CRISP-DM.....	40
Abbildung 2-13: Regressionsverfahren	46
Abbildung 2-14: Kriterien zur Auswahl eines Regressionsalgorithmus	49
Abbildung 2-15: Zwei funktional gleiche Entscheidungsbäume nach RUNKLER	51
Abbildung 2-16: Beispiel eines Regressionsbaums	52
Abbildung 2-17: Random-Forest-Algorithmus	55
Abbildung 3-1: Eigenschaften zur Bewertung und Kategorisierung von technischen Änderungen	61

Abbildung 3-2: Dokumentation und Bereitstellung von Informationen	62
Abbildung 3-3: Objektbereich, Zielbereich und Lösungshypothese der Arbeit	65
Abbildung 3-4: Visualisierung der Änderungsklassifizierung nach BELENER	70
Abbildung 3-5: Prozessorientierte Systematisierung von Änderungskosten in Anlehnung an CONRAT NIEMERG	75
Abbildung 3-6: Statistische Auswertung der ausgewählten Literatur	83
Abbildung 3-7: Bewertung der analysierten Ansätze	84
Abbildung 3-8: Korrelationsanalyse der Erfüllungsgrade	86
Abbildung 4-1: Zielbild der Methodik	90
Abbildung 4-2: Inputfaktoren zur Ableitung der inhaltlichen Anforderungen	91
Abbildung 4-3: Nutzenpotenziale durch die verbesserte Prognosegüte und Bündelung von technischen Änderungen	95
Abbildung 4-4: Ordnungsrahmen zur Grobkonzeption	96
Abbildung 4-5: Konzept zur Ermittlung von Beschreibungsmerkmalen	97
Abbildung 4-6: Konzept zur Ableitung differenzierbarer Grundtypen.....	98
Abbildung 4-7: Konzept zur Festlegung der Aufwands- und Nutzendimensionen.....	100
Abbildung 4-8: Modell zur Aufwandsbewertung technischer Änderungen	101
Abbildung 4-9: Konzept zur Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen.....	102
Abbildung 4-10: Teilmodelle zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse.....	104
Abbildung 5-1: Übersicht des ersten Teilmodells	108
Abbildung 5-2: Vorgehen bei der Literaturanalyse.....	110
Abbildung 5-3: Ergebnisse der durchgeführten Literaturanalyse	111
Abbildung 5-4: Design Structure Matrix mit Merkmalsabhängigkeiten.....	114
Abbildung 5-5: Geordnete Design Structure Matrix.....	115

Abbildung 5-6: Beschreibungsmodell technischer Änderungen.....	124
Abbildung 5-7: Übersicht des zweiten Teilmodells	125
Abbildung 5-8: Einflussmatrix zur Festlegung typenbildender Merkmale.....	129
Abbildung 5-9: Paarweise Konsistenzbewertung	133
Abbildung 5-10: Festlegung der optimalen Anzahl an Grundtypen	135
Abbildung 5-11: Häufigkeitsverteilung der Ausprägungen innerhalb der Grundtypen.....	136
Abbildung 5-12: Grundtyp 1.....	137
Abbildung 5-13: Grundtyp 2.....	138
Abbildung 5-14: Grundtyp 3.....	139
Abbildung 5-15: Grundtyp 4.....	140
Abbildung 5-16: Grundtyp 5.....	142
Abbildung 5-17: Übersicht des dritten Teilmodells.....	144
Abbildung 5-18: Grundlagen der Systemtheorie	146
Abbildung 5-19: Prozessorientierte Systematisierung von Änderungskosten.....	149
Abbildung 5-20: Prozesskosten des Änderungsvorlaufs	150
Abbildung 5-21: Folgekosten des Änderungsvorlaufs	150
Abbildung 5-22: Prozesskosten der Änderungsdurchführung	151
Abbildung 5-23: Folgekosten der Änderungsdurchführung	152
Abbildung 5-24: Fallübergreifende Änderungsfolgekosten.....	152
Abbildung 5-25: Zuordnung von Prozesskosten zu Leistungsbereichen	153
Abbildung 5-26: Zusammensetzung von Herstellkosten.....	155
Abbildung 5-27: Übersicht des vierten Teilmodells	158
Abbildung 5-28: Beispielhaft ausgefüllte Vorlagen für technische Änderungen	159
Abbildung 5-29: Vereinfachtes Beispiel für die Anwendung des Jaccard- Koeffizienten	160

Abbildung 5-30: Tabellarische Darstellung der vorbereiteten Datenbasis	162
Abbildung 5-31: Beispiel des One-hot-Encoding anhand der Änderungstypen	163
Abbildung 5-32: Schematischer Aufbau des Random-Forest-Algorithmus	169
Abbildung 5-33: Exemplarische Darstellung für einen Vergleich der Prognosegüte aufgeteilt nach Grundtyp	170
Abbildung 5-34: Übersicht des fünften Teilmodells	173
Abbildung 5-35: Inputdaten der zu bewertenden neuen technischen Änderungen	174
Abbildung 5-36: Exemplarische vorhergesagte Änderungsaufwände	174
Abbildung 5-37: Beispielhafte Jaccard-Koeffizient für Änderungsbündel.....	176
Abbildung 5-38: Definition von Änderungsbündeln durch Kombinatorik	177
Abbildung 5-39: Aufwandsprofil technischer Änderungen	178
Abbildung 5-40: Bewertung der Aufwandsreduktion durch Änderungsbündelung	178
Abbildung 5-41: Beispielhafte Kosten bei Bündelung von Änderungen	180
Abbildung 5-42: Exemplarische Darstellung der Umsetzungsempfehlung.....	184
Abbildung 6-1: Ausgangsbasis der Validierung.....	189
Abbildung 6-2: Jaccard-Koeffizienten mit ermitteltem Grundtyp.....	190
Abbildung 6-3: Nutzen und Aufwand der neuen technischen Änderungen	193
Abbildung 6-4: Bewertete Änderungsbündel.....	194

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 5-1: Potenzielle Merkmale zur Beschreibung technischer Änderungen.....	113
Tabelle 5-2: Bewertungskriterien der Konsistenzanalyse	131
Tabelle 5-3: Festzulegende Parameter eines Random-Forest-Algorithmus	164
Tabelle 6-1: Auswahl der Startparameter	191
Tabelle 6-2: Werte der Hyperparameteroptimierung	192
Tabelle 6-3: Ausgewählte Modellparameter	192

Verzeichnis der Abkürzungen

AdaBoosting	Adaptive Boosting
Aufl.	Auflage
Bagging	Bootstrap Aggregating
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CPM	Change Prediction Method
CPM/PDD	Characteristics-Properties Modelling/Property-Driven Development
CPR	Change Propagation Risk
CRISP-DM	Cross-Industry Standard Process in Data Mining
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DSM	Design Structure Matrix
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii
etc.	et cetera
F&E	Forschung und Entwicklung
f.	folgende
FBS	Function-Behaviour-Structure
ff.	fortfolgende
Hrsg.	Herausgeber
i.d.R.	in der Regel
KDD	Knowledge Discovery in Data
MSE	mittlerer quadratischer Fehler
OEM	Original Equipment Manufacturer
Oob	Out-of-bag
PLM	Product Lifecycle Management
PLZ	Produktlebenszyklus
SOM	Self-Organizing Map
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TTM	Time-to-Market

VDI	Verband Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen
z.B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

$\hat{f}_{oob}(x_i)$	Prognosewert
$\hat{f}_{rf}^B(x)$	Vorhersage des Random Forest für die Zielvariable x
\hat{y}_i	Prognostizierter i -ter Wert der Zielvariable
ΔHK_i	Einsparung der Herstellkosten durch Änderung i
ΔUE_i	Steigerung des Umsatzerlöses durch Änderung i
Θ_b	Charakterisierung des b -ten Entscheidungsbaums
FK_i	Fertigungskosten der Änderung i
MK_i	Materialkosten der Änderung i
MSE_{oob}	Mittlerer quadratischer Fehler der Out-of-bag-Prognose
p_i	Wahrscheinlichkeit der Zuteilung
y_i	Tatsächlicher i -ter Wert der Zielvariable
\cap	Anzahl gleicher Merkmalsausprägungen
\cup	Anzahl aller Merkmalsausprägungen
T	Einzelner Entscheidungsbaum
X	Vorhersage des einzelnen Entscheidungsbaums
A	Merkmalsausprägungen einer technischen Änderung
B	Anzahl der Bäume
B	Merkmalsausprägungen eines Grundtyps technischer Änderungen
M	Anzahl der Entscheidungsbäume
N	Anzahl der Beobachtungen
O	Aufwand des Verfahrens
P	Gegenwert des Produktes oder der Dienstleistung
p	Marktpreis
t	Zeitpunkt vor der Änderung
$t + 1$	Zeitpunkt nach der Änderung

1 Einleitung

1.1 Motivation

Technische Änderungen werden seit jeher als integraler Bestandteil der Produktentwicklung angesehen und haben einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Prozesse.¹ Dabei sehen sich produzierende Unternehmen in Hochlohnländern in der jüngsten Vergangenheit mit einer Vielzahl an Herausforderungen beim Management von Änderungen in der Produktentwicklung konfrontiert. Das Umfeld der Unternehmen lässt sich dabei insbesondere durch eine hohe Marktdynamik sowie kürzer werdende Produkt- und Technologiezyklen charakterisieren.² Dazu kommen stark volatile und heterogene Kundenanforderungen sowie die steigende Komplexität von Produkten und Produktportfolio durch immer neue Produktvarianten zur Befriedigung der Kundenbedürfnisse.³ Im Kontext des zunehmenden Wettbewerbsdrucks und des Wandels von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt müssen diese Herausforderungen vermehrt mit geringerem Ressourcenaufwand bewältigt werden.⁴

Basierend auf dieser Ausgangssituation ist eine Erfüllung dieser Anforderungen nur durch eine konsequente Steigerung der Entwicklungsproduktivität durch effektivere und effizientere Entwicklungsprozesse möglich.⁵ Dabei haben technische Änderungen einen signifikanten Einfluss auf die Prozessgestaltung der Entwicklung sowie die Entwicklungsproduktivität.⁶ Die Bedeutung von technischen Änderungen wird durch die Treiber Markt und Technologie weiter ansteigen, da es aufgrund von volatilen Kundenanforderungen vermehrt zu kurzfristigen Änderungen im Unternehmensumfeld kommt.⁷

Die zunehmende Anzahl an technischen Änderungen stellt dabei insbesondere eine Herausforderung in Bezug auf die vorhandenen Entwicklungsressourcen dar. Zusammenfassend zeigen verschiedene Studien, dass zwischen 20% und 30% der gesamten

¹ Vgl. Fricke et al. (2000), Coping with changes, S. 169; Wasmer et al. (2011), An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing, S. 533

² Vgl. Krause (2018), Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien

³ Vgl. Schuh et al. (2016), Structuring highly iterative product development projects by using HIP-indicators, S. 1171; ElMaraghy et al. (2013), Product variety management, S. 629

⁴ Vgl. Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 1

⁵ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 4

⁶ Vgl. Koch et al. (2015), Studie: Änderungsmanagement in der Produktion, S. 33

⁷ Vgl. Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme, S. 3

Entwicklungsressourcen für technische Änderungen aufgewendet werden.⁸ Durch technische Änderungen kann es so zu Blockaden von großen Teilen der Entwicklungsressourcen kommen.⁹ Ein maßgeblicher Anteil der den Unternehmen zur Verfügung stehenden Entwicklungsressourcen wird dabei durch die Bewertung und Bearbeitung von technischen Änderungen aufgewendet.¹⁰ Eine technische Änderung beschreibt dabei eine Änderung an Teilen, Zeichnungen oder Software, die bereits während des Produktentstehungsprozess freigegeben wurden. Insbesondere bei kritischen technischen Änderungen, die den Erfolg eines Entwicklungsprojekts gefährden, sind im Durchschnitt 76% aller am Entwicklungsprozess beteiligten Personen ebenfalls bei der Bewertung der technischen Änderungsanfrage eingebunden, so dass diese Ressourcen für neue Entwicklungstätigkeiten blockiert sind.¹¹ Dabei beträgt die Bearbeitungszeit einer technischen Änderung im Schnitt 15% der Projektlaufzeit eines Entwicklungsprojektes.¹²

Die beobachteten Entwicklungen zeigen den Handlungsbedarf auf, den Umgang mit technischen Änderungen zu optimieren und neue Instrumente für die Bearbeitung und Bewertung von technischen Änderungen zu entwickeln.¹³ Hierbei ist eine Ursachenanalyse und Auswirkungsabschätzung zum Treffen einer Entscheidung bezüglich der Durchführung der technischen Änderung ein zentraler Bestandteil.¹⁴ In der Praxis werden die Auswirkungen von technischen Änderungen jedoch systematisch unterschätzt.¹⁵ Insbesondere die Prognosen der Aufwände zur Durchführung einer technischen Änderung weichen erheblich von den tatsächlich benötigten Aufwänden ab.¹⁶ Es fehlt eine Methodik zur Entscheidungsunterstützung für technische Änderungen zur Minimierung der Gesamtänderungskosten.¹⁷

⁸ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 7; Fricke et al. (2000), Coping with changes, S. 170

⁹ Vgl. Kattner et al. (2019), An Approach to Assess Engineering Change Effort Retrospectively Utilizing Past Engineering Change Information, S. 223f.

¹⁰ Vgl. Deubzer et al. (2005), Der Änderungsmanagement Report 2005, S. 4f.; Langer (2016), Änderungsmanagement, S. 513; Yeasin et al. (2020), A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration, S. 869

¹¹ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 10

¹² Vgl. Koch et al. (2015), Studie: Änderungsmanagement in der Produktion

¹³ Vgl. Kim et al. (2017), Mobile and Wireless Technology 2018, S. 1; Riesener et al. (2019), Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests, S. 5f.

¹⁴ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 35f.

¹⁵ Vgl. Charalampos (2017), Planungsleitfaden für die systematische Analyse- und Verbesserung von Produktarchitekturen, S. 91

¹⁶ Vgl. Riesener et al. (2019), Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests, S. 1

¹⁷ Vgl. Riesener et al. (2019), Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests, S. 6

Zusammenfassend lassen sich die genannten Herausforderungen folgendermaßen darstellen: Die steigende Anzahl an technischen Änderungen in komplexen Systemen erfordert immer mehr Ressourcen in den Entwicklungs- und Produktionsbereichen.¹⁸ Dabei beansprucht bereits die Bewertung von technischen Änderungen einen hohen Anteil der Ressourcen und ist geprägt von einem hohen Maß an Interaktion zwischen den Stakeholdern.¹⁹ Die Bewertung erfolgt häufig basierend auf Erfahrungen und dem Bauchgefühl der Mitarbeitenden und liefert oft keine zuverlässigen Aussagen über die tatsächlichen Aufwände einer technischen Änderung.²⁰ Insbesondere aufgrund der weiter steigenden Komplexität und Tragweite der Entscheidungen ist es in Zukunft nicht mehr ausreichend, diese auf Basis von subjektivem Wissen zu treffen.²¹ Aus diesem Grund ergibt sich der Handlungsbedarf, Änderungen vor ihrer Bearbeitung schnell und zielsicher hinsichtlich ihrer tatsächlichen Aufwände bewerten zu können und den Gesamtänderungsaufwand durch die Bündelung von Änderungen mit ähnlicher Ressourcenbeanspruchung zu minimieren.

Als Grundlage zur Lösung dieser Herausforderungen können in den Unternehmen vorhandene Änderungsdaten und moderne Datenanalyseverfahren eingesetzt werden.²² Änderungsdaten sind typischerweise in den Änderungsdatenbanken von Unternehmen gespeichert, da Qualitätsstandards wie die DIN EN ISO 9001:2015 und das Produkthaftungsgesetz die Dokumentation technischer Änderungen einfordern.²³ Diese werden jedoch aktuell in Unternehmen kaum genutzt.²⁴ Die Datenanalyse bietet ein großes Potenzial bei der Unterstützung von Entscheidungsprozessen.²⁵ Dabei kann neben der Güte der Entscheidung auch die Latenz zwischen dem Aufkommen einer technischen Änderungsanfrage und der Entscheidung zu deren Bearbeitung reduziert

¹⁸ Vgl. Kattner et al. (2019), An Approach to Assess Engineering Change Effort Retrospectively Utilizing Past Engineering Change Information, S. 223f.

¹⁹ Vgl. Mehta et al. (2013), An Approach to Determine Important Attributes for Engineering Change Evaluation, S. 1; Becerril et al. (2016), Estimating the effects of Engineering Changes in early stage product development, S. 125; Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme, S. 5

²⁰ Vgl. Mehta et al. (2013), An Approach to Determine Important Attributes for Engineering Change Evaluation, S. 1

²¹ Vgl. Facciano et al. (2016), Data Driven Big Decisions in the Intelligence Age, S. 1

²² Vgl. Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 2; Vgl. Tale-Yazdi et al. (2018), A Literature Review on Approaches for the Retrospective Utilisation of Data in Engineering Change Management, S. 612

²³ Vgl. Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre, S. 102

²⁴ Vgl. Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 2

²⁵ Vgl. KPMG (2017), Mit Daten Werte schaffen, S. 11

werden.²⁶ Bezogen auf das Änderungsmanagement existieren aktuell vor allem datenbasierte Ansätze zur Ausbreitungsvorhersage von technischen Änderungen.²⁷ Dabei werden Datenanalyseverfahren zur Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen hingegen kaum genutzt.²⁸ Durch die Verknüpfung der Herausforderungen bei der Bewertung von technischen Änderungen mit den Stärken von Datenanalyseverfahren wird nachfolgend die Lösungshypothese der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

Im Fokus des vorliegenden Forschungsvorhabens steht die Entwicklung einer Methodik, welche durch vorhandene Daten von technischen Änderungen deren Bewertung mittels prädiktiver Datenanalyse ermöglicht. Entsprechend der Ausführungen kann für die vorliegende Arbeit die folgende Lösungshypothese festgelegt werden:

Der Aufwand technischer Änderungen kann mittels prädiktiver Datenanalyse bewertet werden und durch die Bündelung technischer Änderungen minimiert werden.

Die Idee dieser Arbeit entstand auf Basis von Praxiserfahrungen im Zuge von Industrieprojekten. Hierbei wurde eine Methodik entwickelt, mittels welcher auf Basis von Vergangenheitsdaten eine Vorhersage der notwendigen Entwicklungsressourcen für zukünftige Entwicklungsprojekte erfolgte. Die Daten wurden genutzt, damit die Planung von Entwicklungsressourcen verbessert werden kann. In Analogie dazu können technische Änderungen als Entwicklungsprojekte angesehen werden. Die tatsächlichen Aufwände der vergangenen Änderungen entsprechen dabei den Entwicklungsaufwänden. Um diesen Ansatz jedoch übergreifend anzuwenden, ist insbesondere eine generische Beschreibung von technischen Änderungen und die Beschreibung der genutzten Ressourcen notwendig.

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Zielsetzung der Arbeit kann auf Basis der vorgestellten Herausforderungen abgeleitet werden. Das übergeordnete Ziel ist die Steigerung der Entwicklungsproduktivität. Dies wird erreicht, da durch technische Änderungen Entwicklungsressourcen beansprucht werden. Somit führt eine effiziente Gestaltung des Umgangs mit techni-

²⁶ Vgl. Jank et al. (2019), Product Portfolio Design Using Prescriptive Analytics, S. 585; Vgl. Schuh et al. (2017), Industrie 4.0 Maturity Index - Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten, S. 11ff.

²⁷ Vgl. Yeasin et al. (2020), A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration, S. 869

²⁸ Vgl. Riesener et al. (2019), Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests, S. 6

schen Änderungen ebenfalls zu einer gesteigerten Entwicklungsproduktivität. Der Fokus der Arbeit wird somit auf technische Produktänderungen gelegt. Hierzu muss insbesondere die Auswahl der zu bearbeitenden technischen Änderungen effizient getroffen werden. Weiterhin sollen die Gesamtänderungskosten durch die Bündelung von technischen Änderungen mit ähnlicher Ressourcenbeanspruchung minimiert werden. Durch die Verfügbarkeit von Änderungsdaten und die Fortschritte im Bereich der Datenanalyse kann die Bewertung technischer Änderungen datenbasiert erfolgen. Hieraus lässt sich die Zielsetzung der Arbeit ableiten:

Entwicklung einer Methodik zur Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Produktänderungen mittels prädiktiver Datenanalyse.

Aus der Zielsetzung können die folgenden Teilziele abgeleitet werden:

- Erarbeitung eines **Beschreibungsmodells** für technische Produktänderungen im Kontext der Anwendung prädiktiver Datenanalysen
- Erarbeitung eines **Beschreibungsmodells** für Grundtypen technischer Produktänderungen zur Reduktion der Inputvariablen der prädiktiven Datenanalyse
- Erarbeitung eines **Beschreibungsmodells** für Aufwand und Nutzen technischer Produktänderungen zur Bestimmung der Bilanzgrenzen der Bewertung
- Entwicklung eines **Erklärungsmodells** zur Bestimmung der entstehenden Aufwände technischer Produktänderungen durch ein Prädiktionsmodell
- Entwicklung eines **Entscheidungsmodells** zur Minimierung der Gesamtänderungsaufwände auf Basis der Grundtypen, der Beschreibung und des Prädiktionsmodells

KUBICEK empfiehlt die Formulierung grundlegender Forschungsfragen zur Eingrenzung des Betrachtungsbereiches und Absicherung des Forschungsprozesses.²⁹ Für die vorliegende Dissertation ergibt sich abgeleitet aus der Zielsetzung die folgende Forschungsfrage:

„Wie lässt sich der Aufwand von technischen Produktänderungen auf Basis von Typen mittels prädiktiver Datenanalyse bewerten, um minimale Änderungskosten zu erreichen?“

²⁹ Vgl. Kubicek (1977), Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente der Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, S. 25

Gegenstand der hier vorgestellten Dissertationsschrift ist die Beantwortung dieser Forschungsfrage unter Darlegung des strukturierten Forschungsprozesses. Der zugrunde liegende forschungsmethodische Ansatz wird im Folgenden dargestellt.

1.3 Forschungskonzeption

Der Forschungsprozess kann – bildlich gesprochen – mit einer Reise verglichen werden, auf welcher neue Orte entdeckt und Erfahrungen gemacht werden.³⁰ Dabei ist es die Aufgabe des Forschenden, die gemachten Erfahrungen weiterzugeben und dabei sowohl die Erkenntnisperspektive als auch die methodologische Vorgehensweise des Erkenntnisprozesses zu verdeutlichen.³¹

Die vorliegende Arbeit wird entsprechend der Wissenschaftssystematik von ULRICH ET AL. eingeordnet. Dabei können die Teilgebiete Formalwissenschaften und Realwissenschaften unterschieden werden (siehe Abbildung 1-1).

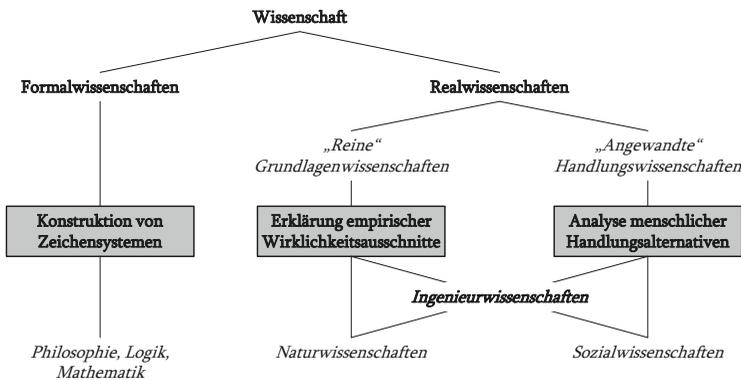


Abbildung 1-1: Wissenschaftssystematik³²

Den Formalwissenschaften sind die Philosophie, die Logik oder die Mathematik zuzuordnen. Hierbei wird jeweils das Ziel verfolgt, mittels der Konstruktion von Zeichensystemen und Regeln Zeichen oder Sprachen zu entwickeln. Im Gegensatz hierzu können die Realwissenschaften und deren Ziele in weitere Unterkategorien mit spezifi-

³⁰ Vgl. Binder et al. (1996), Technologiepotentiale, S. 3f.

³¹ Vgl. Binder et al. (1996), Technologiepotentiale, S. 3

³² In Anlehnung an Ulrich et al. (1976), Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1, S. 305

schen Zielsetzungen unterteilt werden. Hierbei werden die „reinen“ Grundlagenwissenschaften von den „angewandten“ Handlungswissenschaften unterschieden. Den Grundlagenwissenschaften kann das Ziel zugewiesen werden, Ausschnitte aus der Wirklichkeit zu erklären. Hierzu zählen die Physik, die Chemie oder auch die Biologie. Den angewandten Handlungswissenschaften wiederum können die Psychologie und die Betriebswirtschaftslehre zugeordnet werden. Hierbei werden praktische Ziele verfolgt, indem menschliche Handlungsalternativen analysiert werden.³³

An der Schnittstelle zwischen den angewandten Wissenschaften und den reinen Grundlagenwissenschaften werden die Ingenieurwissenschaften eingeordnet, welche sich realer Problemstellungen annehmen und diese mit Verzicht auf Geschlossenheit und vollkommene Mathematisierung als reine Theorien lösen.³⁴ In den Unterkapiteln 1.1 und 1.2 wurde bereits gezeigt, dass in der vorliegenden Arbeit auf die Bewertung und Auswahl von technischen Änderungen als Forschungsgegenstand eingegangen wird. Dieser hat als Betrachtungsbereich technische Produkte aus der produzierenden Industrie, so dass sich diese Arbeit in den Kontext der Ingenieurwissenschaften einordnen lässt. Die zu entwickelnde Methode verfolgt dabei das Ziel, eine Unterstützung für Ingenieure im Bereich des technischen Änderungsmanagements darzustellen, damit der Gesamtänderungsaufwand minimiert werden kann. Weiterhin kann durch eine fundierte Auswahl der durchzuführenden Änderungen die Effektivität innerhalb der Produktentwicklung gesteigert werden. Wie oben beschrieben, erhebt die hier erarbeitete Methodik keinen Anspruch auf mathematische Vollständigkeit und Ausschließlichkeit, sondern dient den Anwendern als Handlungsunterstützung.

Nachdem die Erkenntnisperspektive dargestellt wurde, folgt die Beschreibung der Vorgehensweise entlang des Erkenntnisprozesses. Die Darstellung einer Leitidee zur Vorgehensweise im Forschungsprozess hilft dabei, Subjektivität in der wissenschaftlichen Arbeit in Form vorwissenschaftlicher Erkenntnisse und weggebundener Annahmen auszuschließen.³⁵ Dabei soll durch die Verwendung von Grundmodellen sichergestellt werden, dass die wissenschaftliche Gemeinschaft eine gemeinsame Orientierung verfolgt.³⁶ Als theoretische Grundmodelle gelten in diesem Kontext der theoretische Ansatz nach GUTENBERG, der entscheidungstheoretische Ansatz nach HEINEN und der systemtheoretische Ansatz nach ULRICH ET AL.³⁷ Insbesondere der systemtheoretische Ansatz von ULRICH ET AL. weist dabei einen Bezug zu den Ingenieurwissenschaften

³³ Vgl. Ulrich et al. (1976), *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1*, S. 305f.

³⁴ Vgl. Ulrich et al. (1976), *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1*, S. 308

³⁵ Vgl. Ulrich et al. (1976), *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1*, S. 306

³⁶ Vgl. Kuhn (2001), *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, S. 25

³⁷ Vgl. Ulrich et al. (1976), *Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1*, S. 307

auf und zielt zeitgleich auf reale Problemstellungen der Unternehmensführung.³⁸ Angelehnt an diesen Ansatz wird in Abbildung 1-2 der Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Angewandte Wissenschaft im Theorie- und Praxisbezug nach ULRICH ET AL.		Forschungsprozess der vorliegenden Arbeit
Praxis	① Erfassung und Typisierung praxisrelevanter Probleme	Formulierung des Problems auf Basis des praktisch erworbenen Erfahrungsschatzes
	② Erfassung und Interpretation problemrelevanter Theorien und Hypothesen der empirischen Grundlagenwissenschaften	Erfassung bestehender Theorien zum Änderungsmanagement in der produzierenden Industrie
	③ Erfassung und Spezifizierung problemrelevanter Verfahren der Formalwissenschaften	Nutzung von bestehenden Erkenntnissen aus dem Bereich der prädiktiven Datenanalyse
	④ Erfassung und Untersuchung des relevanten Anwendungszusammenhangs	Nutzung der Erfahrung aus themenrelevanten Forschungs- und Beratungsprojekten
	⑤ Ableitung von Beurteilungskriterien, Gestaltungsregeln und -modellen	Exploration des Erfahrungswissens durch analytische Ableitung der Lösungselemente
	⑥ Prüfung der Regeln und Modelle im Anwendungszusammenhang	Validierung des entwickelten Modells anhand eines Fallbeispiels
	⑦ Beratung in der Praxis	Transfer der Erkenntnisse über bilaterale Projekte und Fokusgruppen

Abbildung 1-2: Forschungsprozess nach ULRICH ET AL.³⁹

Wie bereits angedeutet, sind die adressierten Problemstellungen der Forschungsarbeit Gegenstand von Forschungs- und Beratungsprojekten des Autors im Rahmen der Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssystematik des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen. Problemrelevante Theorien und bestehende Ansätze zu technischen Änderungen werden durch eine umfangreiche Literaturrecherche untersucht. Weiterhin werden bestehende Ansätze zur Nutzung prädiktiver Datenanalyse zur Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen durch eine Literaturanalyse identifiziert und bewertet. Somit ist die geforderte Interdisziplinarität nach ULRICH ET AL. erfüllt. In Forschungs- und Beratungsprojekten, die während des Erstellungsprozesses der Forschungsarbeit fortlaufend bearbeitet wurden, wird der Anwendungszusammenhang des Forschungsgegenstands sichergestellt. Abschließend werden die zu entwickelnden Teilmodelle abgeleitet und deren Anwendbarkeit auf Basis einer Fallstudie für ein ausgewähltes Unternehmen der produzierenden Industrie wird überprüft.

³⁸ Vgl. Ulrich et al. (1976), Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1, S. 307ff.

³⁹ In Anlehnung an Ulrich et al. (1984), Management, S. 193

1.4 Aufbau der Arbeit

Nachdem die vorliegende Forschungsarbeit im Kontext der Wissenschaftssystematik eingeordnet ist und der Forschungsprozess nach ULRICH ET AL. dargestellt wurde, erfolgt im Anschluss eine Erläuterung des Aufbaus der Arbeit. Hierzu werden die einzelnen Kapitel in die Phasen des Forschungsprozesses eingeordnet (siehe Abbildung 1-3).

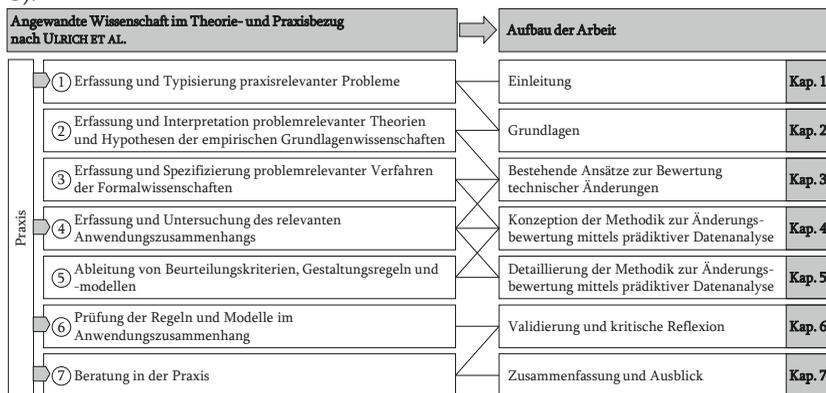


Abbildung 1-3: Aufbau der Arbeit⁴⁰

Das erste Kapitel dient der Einführung in die Thematik. Nachdem Motivation und Zielsetzung der Arbeit vorgestellt wurden, folgen das Forschungskonzept und der Aufbau der Arbeit.

Im zweiten Kapitel werden die für das Verständnis der Arbeit grundlegenden Begrifflichkeiten und Zusammenhänge des Forschungsgegenstands erläutert. Dazu werden die Themen Produktentwicklung, technisches Änderungsmanagement, Datenanalyse und insbesondere das Maschinelle Lernen als Prognoseverfahren dargestellt. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit.

Das dritte Kapitel verfolgt das Ziel, den Forschungsbedarf für die vorliegende Arbeit aufzuzeigen. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Herausforderungen in der Praxis analysiert, bevor bestehende Ansätze dargestellt und bewertet werden. Die Bewertung erfolgt anhand zuvor festgelegter Kriterien, welche den Objektbereich und den Zielbereich der vorliegenden Arbeit beschreiben. Außerdem wird die Lösungshypothese mit den Ansätzen der bestehenden Arbeiten verglichen.

⁴⁰ In Anlehnung an Ulrich et al. (1984), Management, S. 193

Aufbauend auf dem dritten Kapitel sowie dem herausgearbeiteten Forschungsbedarf erfolgt im vierten Kapitel die Konzeption der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Hierbei werden die inhaltlichen und formalen Anforderungen an die Methodik dargestellt. Anschließend wird das Grobkonzept basierend auf dem Ordnungsrahmen der Methodik abgeleitet, bevor abschließend die Teilmodelle der Methodik formuliert werden.

Die Ausarbeitung der Teilmodelle erfolgt in Kapitel 5 unter Berücksichtigung der zuvor definierten Anforderungen. Hierbei ist kontinuierlich die Anwendbarkeit der Methodik zu überprüfen.

Die Validierung der Methodik erfolgt im sechsten Kapitel anhand eines Fallbeispiels. Hierzu werden reale Unternehmensdaten verwendet, damit die Anwendbarkeit der Methodik als zusammenhängendes Gesamtergebnis in der Praxis sichergestellt werden kann.

Abschließend werden in Kapitel 7 die Ergebnisse der Forschungsarbeit zusammengefasst und es folgt ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf.

2 Grundlagen

Im vorherigen Kapitel wurde die vorliegende Arbeit motiviert, die Zielsetzung der Arbeit vorgestellt und die Forschungskonzeption beschrieben. Im folgenden Kapitel werden die inhaltlichen Grundlagen erläutert. Hierzu werden wesentliche Begriffe eingeführt und relevante Methoden und Konzepte im Kontext der Forschungsfrage werden vorgestellt. Der Aufbau des Kapitels folgt dabei der Hauptforschungsfrage: *„Wie lässt sich der Aufwand von technischen Produktänderungen auf Basis von Typen mittels prädiktiver Datenanalyse bewerten, um minimale Änderungskosten zu erreichen?“* In Bezug auf diese Frage wird in Unterkapitel 2.1 die Produktentwicklung produzierender Unternehmen als übergeordneter Objektbereich der Arbeit vorgestellt. In Unterkapitel 2.2 werden technische Änderungen sowie der Änderungsprozess und die Bewertung von Änderungen betrachtet. In Unterkapitel 2.3 wird der Bereich der Datenanalyse vorgestellt. Abschließend werden in Unterkapitel 2.4 Prognoseverfahren mittels Maschinellen Lernens eingeführt. Das Unterkapitel 2.5 bildet ein Zwischenfazit der Grundlagen und Definitionen.

2.1 Produktentwicklung in produzierenden Unternehmen

In diesem Unterkapitel werden die relevanten Begrifflichkeiten der Produktentwicklung von produzierenden Unternehmen eingeführt. Es wird insbesondere auf die Bedeutung des Innovationsprozesses und der Produktentwicklung eingegangen. Weiterhin wird das technische Änderungsmanagement hierzu in Kontext gesetzt.

2.1.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten

In diesem Teilkapitel werden Begrifflichkeiten, welche im Zusammenhang zur Produktentwicklung in produzierenden Unternehmen stehen, voneinander abgegrenzt, diskutiert und für die vorliegende Arbeit definiert.

Produzierende Unternehmen

Der Begriff „produzieren“ bzw. „Produktion“ leitet sich sprachwissenschaftlich aus dem lateinischen Verb „producere“ ab und bedeutet „hervorführen, hervorbringen oder erzeugen“.⁴¹ VOIGT definiert die Produktion als das Hervorbringen von Wirtschaftsgütern durch die Kombination von Produktionsfaktoren.⁴² Der Begriff Güter schließt an dieser Stelle sowohl immaterielle als auch materielle Güter ein. Nach DYCKHOFF ist die Produktion eine gezielte qualitative, quantitative, räumliche oder zeitliche Veränderung von Objekten auf Veranlassung des Menschen.⁴³

Der Begriff Unternehmen wird als wirtschaftlich-finanzielle und rechtliche Einheit definiert.⁴⁴ Als allgemeine Aufgabe von Unternehmen wird in der gesamtwirtschaftlichen Perspektive das Bereitstellen von Arbeitsplätzen, Sachgütern und Dienstleistungen verstanden, wobei in den Unternehmen Produktionsfaktoren (Input) kombiniert und zu Endprodukten (Output) transformiert werden.⁴⁵ Weiterhin nehmen Unternehmen eine wichtige Rolle für die gesamtwirtschaftliche Entwicklung ein. Dies geschieht maßgeblich durch technische Innovationen und Produktivitätsfortschritte im Sinne des Innovationsprozesses und der Produktentwicklung.⁴⁶ Produzierenden Unternehmen werden bspw. Lebensmittelproduzenten, Textilhersteller, Erzeuger von chemischen Produkten oder Metallserzeugnissen sowie der Maschinen- und Anlagenbau zugeordnet.⁴⁷

Zusammenfassend wird der Begriff der produzierenden Unternehmen für die vorliegende Arbeit als Kombination der bereits genannten Einzelbegriffsdefinitionen angesehen. Produzierende Unternehmen sind somit wirtschaftliche und rechtliche Einheiten, welche Produktionsfaktoren kombinieren und in Endprodukte transformieren.

⁴¹ Vgl. Voigt (2018), Definition Produktion

⁴² Vgl. Voigt (2018), Definition Produktion

⁴³ Vgl. Dyckhoff et al. (2010), Produktionswirtschaft, S. 24

⁴⁴ Vgl. Haric et al. (2019), Stichwort Unternehmen

⁴⁵ Vgl. Haric et al. (2019), Stichwort Unternehmen

⁴⁶ Vgl. Haric et al. (2019), Stichwort Unternehmen

⁴⁷ Vgl. Statistisches Bundesamt (2008), Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008), S. 186

Innovationsprozess

Dem Innovationsprozess kommt innerhalb der produzierenden Unternehmen eine besondere Bedeutung zu, da er einen Kernprozess zur Sicherung der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit darstellt.⁴⁸

Der Innovationsprozess nach SPECHT ET AL. beschreibt dabei die Phasen der Ideengenerierung und endet mit der Markteinführung eines Produkts. Weiterhin beinhaltet er die Forschung und Entwicklung (siehe Abbildung 2-1).⁴⁹ Aufgrund der Bedeutung von Forschung und Entwicklung sowie der Produktentwicklung als inhärentem Teil davon werden diese anschließend beschrieben.

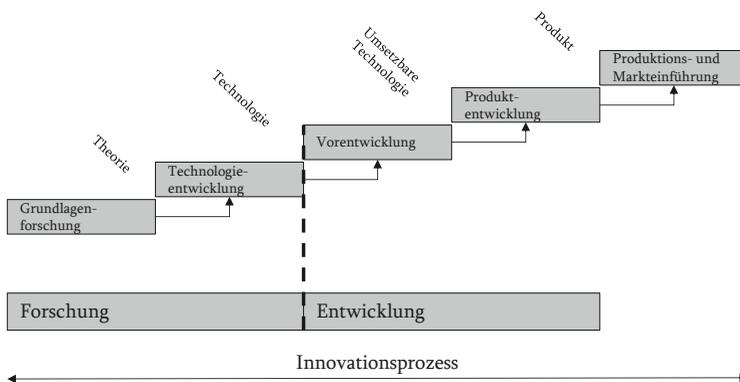


Abbildung 2-1: Innovationsprozess nach SPECHT ET AL.⁵⁰

Produktentstehungsprozess

Der Produktentstehungsprozess umfasst den gesamten Prozess von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf.⁵¹ Beim Produktentstehungsprozess wird neben der Entwicklung eines Produktes die Phase der Realisierung, inklusive der Fertigung, Montage und Inbetriebnahme, mitberücksichtigt. GAUSEMEIER ET AL. beschreiben den Produktentstehungsprozess als drei überlappende Zyklen. Der erste Zyklus ist die strategische Produktplanung, der zweite die Produktentwicklung und der dritte die Produktionssystementwicklung.⁵²

⁴⁸ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 2

⁴⁹ Vgl. Specht et al. (2002), F&E-Management, S. 16

⁵⁰ In Anlehnung an Specht et al. (2002), F&E-Management, S. 16

⁵¹ Vgl. Gausemeier et al. (2014), Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, S. 39

⁵² Vgl. Gausemeier et al. (2014), Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, S. 39

Produktentwicklung

Der Begriff „Produkt“ stammt vom lateinischen Wort „productum“ ab und bezeichnet das Hervorgebrachte. Die Industriebetriebslehre unterscheidet als Produkte hierbei Sachgüter (materiell, Gebrauchsgüter und Verbrauchsgüter), Dienstleistungen (immateriell) und Energieleistungen.⁵³

Die DIN EN ISO 9000 beschreibt den Begriff „entwickeln“ als „Satz von Prozessen, der Anforderungen an ein Objekt in detailliertere Anforderungen an dieses Objekt umwandelt“⁵⁴. Angewandt auf die Produktentwicklung, lässt sich darunter die Umwandlung von Anforderungen in spezifizierte Produktmerkmale verstehen. Demnach sind die Eingangsgrößen des Produktentwicklungsprozesses Anforderungen, die mit Fortschreiten des Prozesses in ein Produktmodell überführt werden. Das Aufgabenspektrum der Produktentwicklung reicht von der Auslegung von Kleinteilen bis hin zur Entwicklung von großen Maschinen und Anlagen. SCHUH⁵⁵ definiert die Produktentwicklung als einen Kernprozess des Innovationsmanagements. Weiterhin ordnet BENDER⁵⁶ die Produktentwicklung als Teil des Produktentstehungsprozesses in den Bereich der Forschung und Entwicklung ein. Das Ziel der Produktentwicklung ist die Befriedigung von Bedürfnissen unternehmensinterner und -externer Kunden, das Bedienen eines Markts und schließlich die Erzielung von Gewinn.⁵⁷ Die Kosten, als gewinnreduzierender Faktor, sollen dabei so gering wie möglich ausfallen.⁵⁸ Dazu existieren zahlreiche Prozessmodelle, welche die Abläufe der Produktentwicklung strukturieren.

Nachdem in diesem Teilkapitel die grundlegenden Begrifflichkeiten definiert wurden, folgt im anschließenden Teilkapitel 2.1.2 ein detaillierter Überblick bezüglich der Produktentwicklung sowie deren Einordnung in den Kontext der F&E. Dabei wird insbesondere gezeigt, welche Schnittmengen das technische Änderungsmanagement mit der Produktentwicklung hat und wo dieses über die Produktentwicklung hinausgeht.

⁵³ Vgl. Voigt (2018), Stichwort Produkt

⁵⁴ DIN EN ISO 9000. (2015), Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe, S. 35

⁵⁵ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement

⁵⁶ Vgl. Bender et al. (2016), Entwicklungsprozesse

⁵⁷ Vgl. Bender et al. (2016), Entwicklungsprozesse, S. 401

⁵⁸ Vgl. Bender et al. (2015), Erfolgsindikatoren in der technischen Produktentwicklung, S. 359

2.1.2 Produktentstehungsprozess und Produktentwicklung

In der Literatur wird zwischen dem Produktentstehungsprozess als gesamter Prozess von der Geschäftsidee bis zum Serienanlauf und der Produktentwicklung als Teilprozess davon unterschieden.⁵⁹ Zu differenzieren ist dementsprechend der Produktentwicklungsprozess vom Produktentstehungsprozess. Beim Produktentstehungsprozess wird neben den Aspekten der Entwicklung eines Produktes die Phase der Realisierung, inklusive der Fertigung, Montage und Inbetriebnahme, mitberücksichtigt.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit ist der Produktentstehungsprozess hoch relevant für das Feld der technischen Änderungen. Ein Großteil der Änderungen entsteht genau innerhalb dieses Prozesses, in welcher auch ein wesentlicher Teil des Aufwands bei der Bearbeitung von technischen Änderungen anfällt.⁶⁰ Die Bearbeitung technischer Änderungen findet typischerweise innerhalb der Grenzen des Produktentstehungsprozesses statt. Auf die technischen Änderungen und deren Management wird in Unterkapitel 2.2 detailliert eingegangen, nachdem hier der Rahmen für deren Bearbeitung aufgespannt wird.

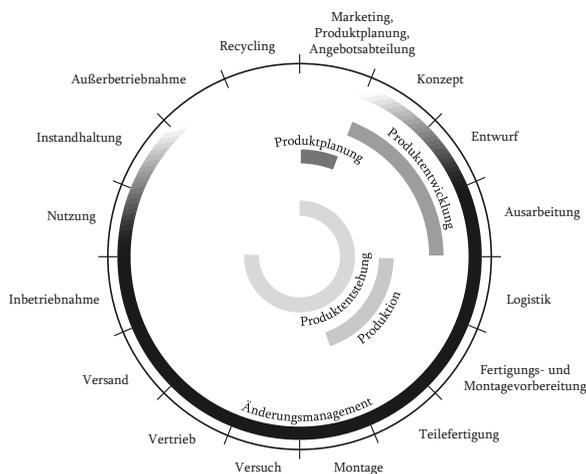


Abbildung 2-2: Produktentstehungsprozess nach EHRENSPIEL ET AL.⁶¹

⁵⁹ Vgl. Gausemeier et al. (2014), Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, S. 39

⁶⁰ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2013), Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, S. 158

⁶¹ In Anlehnung an Ehrlenspiel et al. (2013), Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit

Der Produktentstehungsprozesses wird nach EHRENSPIEL ET AL. als Zeitraum zwischen der Idee und dem Anlauf der Produktion definiert (siehe Abbildung 2-2).⁶² EHRENSPIEL ET AL. beschreiben dabei den Kernprozess als Produktentwicklung, welcher als integrierter und umfassender Erstellungsprozess von Produkten zu verstehen ist. Hierdurch wurde in der Literatur der Begriff der Integrierten Produktentwicklung geprägt.⁶³ Dabei können nach SPATH ET AL. folgende Tendenzen in der Produktentwicklung beobachtet werden:⁶⁴

- Die Phasen der Produktentwicklung werden zunehmend parallelisiert.
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit nimmt zu.
- Wertschöpfungsketten entwickeln sich zu Wertschöpfungsnetzwerken.
- Steigender Anteil an cyberphysischen Produkten.
- Dienstleistungen gewinnen an Bedeutung.

Einen Überblick über die Prozesse der Produktentwicklung gibt SCHUH (siehe Abbildung 2-3). Die Prozesse Anforderungsmanagement, Konstruktionsmethodik und Ergebnisanalyse bilden dabei den sequenziellen Kernprozess, während die Prozesse Änderungsmanagement und Simultaneous Engineering den gesamten Produktentwicklungsprozess begleiten. Dabei werden dem Änderungsmanagement die Aufgaben der Organisation, Verwaltung und Abwicklung von Änderungen während des Entwicklungsprojektes zugeordnet.⁶⁵ Diese Zuordnung von Aufgaben kann auch in weiteren bekannten Prozessmodellen wiedergefunden werden.

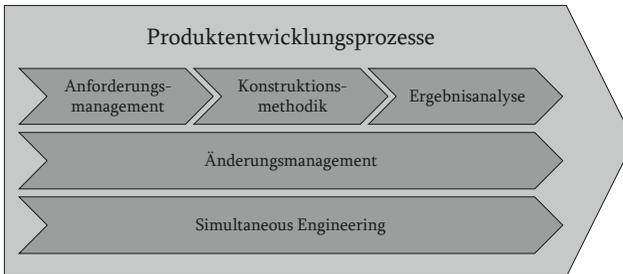


Abbildung 2-3: Produktentwicklungsprozess nach SCHUH⁶⁶

⁶² Vgl. Ehrlenspiel et al. (2013), Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, S. 160

⁶³ Vgl. Eckert et al. (2004), Change and customisation in complex engineering domains

⁶⁴ Vgl. Spath et al. (2016), Produktentwicklung Quo Vadis, S. 3

⁶⁵ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 221

⁶⁶ In Anlehnung an Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 162

Zu den bekannten Prozessmodellen in der Produktentwicklung gehören die VDI 2221 „Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte“⁶⁷, die VDI 2206 „Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme“⁶⁸, in welcher auch der V-Prozess vorgestellt wird, das Wasserfallmodell nach ROYCE⁶⁹, das Stage-Gate®-Modell nach COOPER⁷⁰ und das Spiralmodell nach BOEHM⁷¹. Allen Modellen ist gemein, dass sie sich mit den Aktivitäten des sequenziellen Kernprozesses beschäftigen, während die begleitenden Prozesse des Änderungsmanagements und des Simultaneous Engineering als Bestandteile beschrieben, aber nicht in signifikantem Umfang aufgegriffen werden.

Der Produktentstehungsprozess bildet somit den Rahmen für diese Arbeit, welche den Fokus auf den Begleitprozess im Sinne des Änderungsmanagements und technische Änderungen legt. Entsprechend dieser Einordnung greifen auch FELDHUSEN ET AL. auf die genannten Modelle zurück. Ausgehend von diesen wurde ein umfassenderer Rahmen für den Produktentstehungsprozess und dessen Begleitprozesse aufgestellt (siehe Abbildung 2-4).⁷²

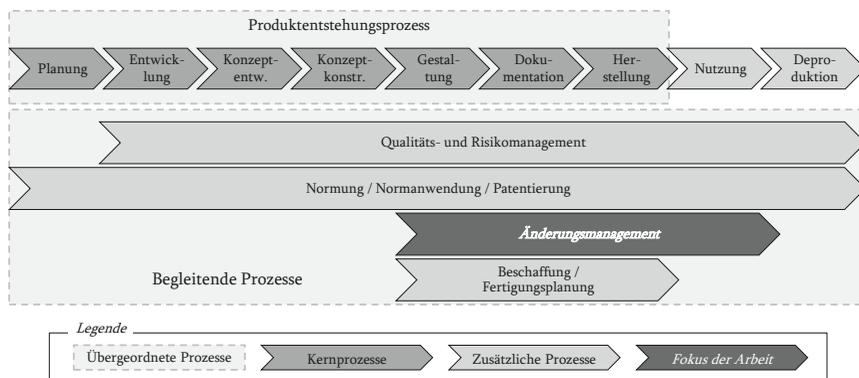


Abbildung 2-4: Produktentstehungsprozess mit begleitenden Prozessen⁷³

⁶⁷ Verein Deutscher Ingenieure (1993), VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

⁶⁸ Verein Deutscher Ingenieure (2004), VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

⁶⁹ Royce (1970), Managing the development of large software systems

⁷⁰ Cooper (1990), Stage-gate systems - A new tool for managing new products

⁷¹ Vgl. Boehm (1988), A spiral model of software development and enhancement

⁷² Vgl. Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre

⁷³ In Anlehnung an Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre, S. 23

Das Änderungsmanagement ist als begleitender Prozess maßgeblich innerhalb des Produktentstehungsprozesses verortet, wobei für das Änderungsmanagement auch die Nutzungsphase von Relevanz ist. Innerhalb dieser Phase können weiterreichende Änderungen in die Phasen der Produktentstehung zurückgespielt werden. Dadurch werden Entwicklungsressourcen für die Bearbeitung von technischen Änderungen beansprucht. Dies ist als kritisch anzusehen, da somit weniger Ressourcen zu den Neuentwicklungen von Produkten zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund ist eine sinnvolle Auswahl der zu bearbeitenden Änderungsprojekte zu treffen (siehe Unterkapitel 1.2) Die Bedeutung von technischen Änderungen innerhalb des Produktentstehungsprozesses hat einen signifikanten Einfluss auf die Gestaltung der Prozesse innerhalb der Produktentstehung.⁷⁴ Dabei ist der Prozess der Auswirkungsabschätzung, um eine Durchführungsentscheidung für eine technische Änderung treffen zu können, als zentral für eine effektive Entwicklung anzusehen.⁷⁵

Nachdem innerhalb dieses Teilkapitels eine Einordnung des technischen Änderungsmanagements innerhalb des Produktentstehungsprozesses erfolgte, wird im Unterkapitel 2.2 das technische Änderungsmanagement detailliert betrachtet.

⁷⁴ Vgl. Koch et al. (2015), Studie: Änderungsmanagement in der Produktion

⁷⁵ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 34ff.

2.2 Technisches Änderungsmanagement

Die Organisation von Änderungen wird als technisches Änderungsmanagement bezeichnet und spielt für die Effektivität und Effizienz der Produktentstehung eine entscheidende Rolle.⁷⁶ Technische Änderungen sind fester Bestandteil der Produktentstehung. Sie bieten die Möglichkeit, Abweichungen zwischen dem aktuellen Entwicklungsstand und dem Ziel der Produktentwicklung zu beheben. Veränderte Marktbedürfnisse oder Fehler im Entwicklungsprozess können so revidiert werden.⁷⁷

Im folgenden Teilkapitel werden zu Beginn relevante Begrifflichkeiten mit Bezug zum technischen Änderungsmanagement definiert. Anschließend erfolgt die Vorstellung unterschiedlicher Änderungsprozesse. Den Abschluss bilden das Teilkapitel 2.2.3, in welchem auf die Bewertung von technischen Änderungen eingegangen wird, und das Teilkapitel 2.2.4, in welchem deren Dokumentation beschrieben wird.

2.2.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten

Das technische Änderungsmanagement definiert sowohl die Tätigkeiten als auch die Prozesse, um Änderungen strukturiert und nachvollziehbar in den Produktentstehungsprozess zu bringen. Technische Änderungen gehen häufig mit Änderungen von Produktions- oder Organisationsprozessen einher und werden initiiert, um die Verkaufsfähigkeit eines Produktes zu erhöhen.⁷⁸ Im Folgenden werden aktuelle, in der wissenschaftlichen Literatur anerkannte Definitionen vorgestellt.

Technisches Änderungsmanagement

Bei der Einordnung des technischen Änderungsmanagements in den Produktentstehungsprozess werden diesem die Aufgaben zugeschrieben, Strategien und Maßnahmen zur Handhabung des Änderungsvorlaufs, der Änderungsdurchführung und der fallübergreifenden Änderungsorganisation und -prävention innerhalb eines Unternehmens zu organisieren.⁷⁹ Das technische Änderungsmanagement definiert sich daher in Anlehnung an SCHUH⁸⁰ wie folgt:

„Das technische Änderungsmanagement umfasst die Aufnahme, Erfassung, Bewertung und ggf. Durchführung von Änderungsanforderungen in einem definierten und systematischen Prozess. Dazu gehört die Versions- und Dokumentenverwaltung für technische Änderungen.“

⁷⁶ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 12

⁷⁷ Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

⁷⁸ DIN 6789-3. (1990), DIN 6789-3:1990-09, S. 2

⁷⁹ Vgl. Langer (2016), Änderungsmanagement, S. 524

⁸⁰ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 185

Ausgehend von dieser Definition ist das Änderungsmanagement stark verzahnt mit dem Produktentstehungsprozess. Die Aufnahme, Erfassung und Bewertung einer Änderung umfasst hierbei i.d.R. Aktivitäten, welche bereits in der Phase der Produktentstehung durchgeführt wurden. Auch die Dokumente sind bereits in der Produktentstehung erstellt worden, müssen jedoch aufgrund von Änderungen bearbeitet und neu versioniert werden. Aus einem in der Vergangenheit rein reaktiven Änderungsmanagement hat sich das integrierte Änderungsmanagement entwickelt, welches die Fokussierung der positiven Auswirkungen von technischen Änderungen als wesentlichen Bestandteil sieht und auf eine Effizienz- und Effektivitätssteigerung des Produktentstehungsprozesses durch technische Änderungen abzielt.⁸¹ Dabei werden drei charakteristische Phasen des Änderungsmanagements unterschieden. LINDEMANN ET AL. definieren in diesem Zusammenhang acht Aktionsfelder zur Steigerung von Effizienz und Effektivität des technischen Änderungsmanagements (siehe Abbildung 2-5).

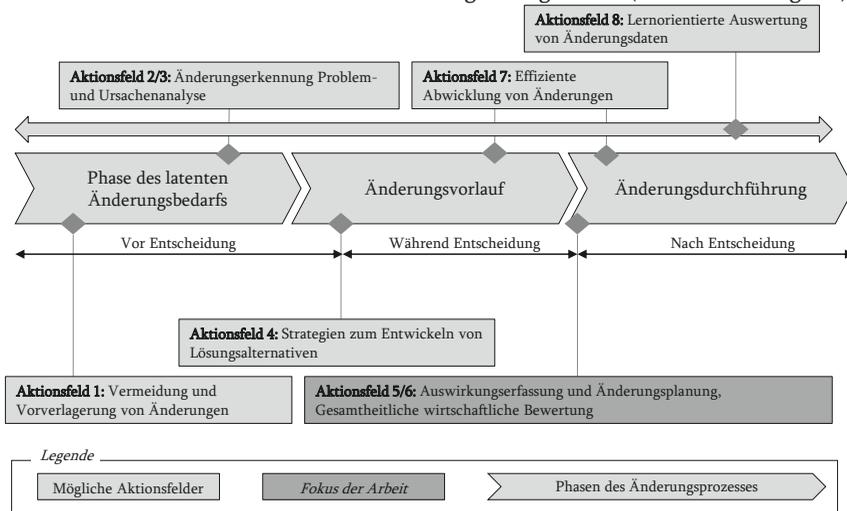


Abbildung 2-5: Darstellung der Aktionsfelder technischer Änderungen nach LINDEMANN ET AL.⁸²

⁸¹ Vgl. Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 51f.

⁸² In Anlehnung an Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 261

Die prinzipiellen Ziele des Änderungsmanagements nach LINDEMANN ET AL.⁸³ sind:
die Vermeidung fehlerbedingter Änderungen
die Vermeidung unwirtschaftlicher Änderungen
die schnelle und zuverlässige Abwicklung notwendiger Änderungen

Die Aktionsfelder nach LINDEMANN ET AL. orientieren sich hierbei an den unterschiedlichen Phasen des Änderungsprozesses, welcher in Teilkapitel 2.2.2 vorgestellt wird. Die hier vorliegende Arbeit kann dabei dem Aktionsfeld 5/6, der Änderungsauswirkungserfassung und Änderungsplanung, bzw. der gesamtheitlichen wirtschaftlichen Bewertung zugeordnet werden.

Technische Änderungsanfrage

Der Begriff der technischen Änderungsanfrage beschreibt technische Änderungen, welche sich noch in der Phase des Änderungsvorlaufs befinden. Sie stellt eine Anfrage dar, einen bereits freigegebenen Umfang des Produkts noch einmal zu verändern.⁸⁴ In dieser Phase ist dementsprechend noch nicht entschieden, ob eine technische Änderung durchgeführt werden soll.

„Eine technische Änderungsanfrage beschreibt die technische Änderung selbst und ist eine Entscheidungsvorlage mit den notwendigen Informationen zur Entscheidungsfindung.“⁸⁵ „Hierzu zählen Grund und Auswirkungen der technischen Änderung, die beteiligten Personen sowie der voraussichtliche Aufwand und Nutzen der Umsetzung.“⁸⁶

Technische Änderung

Der Begriff der Produktänderung wird seit Beginn der 1980er Jahre intensiv in der Literatur thematisiert. Die Definitionen aus dieser Zeit sind meist stark an die Produktdokumentation angelehnt. Dies spiegelt die mittlerweile zurückgezogene DIN 6772 aus dem Jahr 1988 wider, in der eine technische Änderung als „Eingriff in eine technische Produktdokumentation und damit in den festgelegten Zustand des [...] beschriebenen Zustands“⁸⁷ definiert wird. Die Beschränkung auf die Produktdokumentation ist aus heutiger Sicht jedoch als problematisch anzusehen und muss um diverse Faktoren erweitert werden.⁸⁸

⁸³ Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 53

⁸⁴ Vgl. Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 105f.

⁸⁵ Vgl. Verband der Automobilindustrie (2010), ECM Recommendation Part 0, S. 6

⁸⁶ Vgl. Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre, S. 119

⁸⁷ DIN ISO 6772. (1988), DIN ISO 6772:2018-08

⁸⁸ Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 33

Der Begriff „technische Änderung“ wird in der Literatur unterschiedlich definiert: LINDEMANN definiert technische Änderungen als „eine Zustandsveränderung von Produktmodellen, die bereits für die weitere Entwicklung oder Produktion freigegeben sind, zum Zweck der Eigenschaftsveränderung des Produkts unter Einsatz von Zeit und Ressourcen für den Änderungsvorgang“⁸⁹.

In weiterer Literatur existieren leicht unterschiedliche Definitionen für synonym verwendete Begriffe: INNESS⁹⁰ verwendet den Begriff „product change“, GABRIEL⁹¹ „product design change“ oder „engineering design change“. JARRATT ET AL.⁹² beschreiben die Limitationen dieser Definitionen und definieren technische Änderungen wie folgt: „An engineering change is an alteration made to parts, drawings or software that have already been released during the product design process. The change can be of any size or type; the change can involve any number of people and take any length of time.“ Diese Definition wird in vielen Publikationen als Definition von technischen Änderungen zitiert und kann damit als anerkannt angesehen werden.⁹³ Das Verständnis von technischen Änderungen in der vorliegenden Arbeit folgt der Definition von JARRATT ET AL. und wird für den weiteren Verlauf der Arbeit wie folgt festgelegt:

Eine technische Änderung ist eine Änderung an Teilen, Zeichnungen oder Software, die bereits während des Produktentstehungsprozess freigegeben wurden. Die Änderung kann von beliebiger Größe oder Art sein sowie eine beliebige Anzahl von Personen betreffen und jede erdenkliche Zeitspanne in Anspruch nehmen.

Nachdem innerhalb dieses Teilkapitels die wichtigsten Begriffe des technischen Änderungsmanagements beschrieben wurden, folgt im Teilkapitel 2.2.2 eine detaillierte Beschreibung des Änderungsprozesses.

2.2.2 Änderungsprozess

Um technische Änderungen strukturiert und kostengünstig umsetzen zu können, existieren in der Literatur eine Vielzahl von Beschreibungs- und Handlungsmodellen für den Änderungsprozess. Der Änderungsprozess wird bspw. von JARRATT ET AL.,

⁸⁹ Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

⁹⁰ Inness (1994), Achieving successful product change

⁹¹ Gabriel (2001), Redesignit - A Constraint-Based Tool for Managing Design Changes

⁹² Jarratt et al. (2011), Engineering change

⁹³ Vgl. Hamraz et al. (2013), A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management, S. 475; Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 9; Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 56; Grieco et al. (2017), On the Application of Text Clustering in Engineering Change Process, S. 1

FELDHUSEN ET AL., AUGUSTIN ET AL., sowie WICKEL beschrieben.⁹⁴ Als Gemeinsamkeit der Änderungsprozesse kann in jedem dieser Prozesse eine Unterteilung der Schritte in die unterschiedlichen Phasen erfolgen.

Der technische Änderungsprozess zeichnet sich durch drei übergeordnete Phasen aus, welche als die Phasen des latenten Änderungsbedarfs, des Änderungsvorlaufs und der Änderungsdurchführung bezeichnet werden. Dabei ist in der Phase des latenten Änderungsbedarfs eine Soll-Ist-Abweichung zwischen dem aktuellen Zustand und dem gewünschten Ergebnis bereits bekannt, jedoch der Bedarf der Änderung noch nicht formuliert. Diese Phase wird auch als die Phase vor der Entscheidung bezeichnet. Die zweite Phase wird dabei als Änderungsvorlauf oder Phase während der Entscheidung bezeichnet. Hier ist die technische Änderungsanfrage einzuordnen. Die dritte Phase wird als Phase der Änderungsdurchführung oder Phase nach der Entscheidung beschrieben. Hier wird die eigentliche technische Änderung umgesetzt.⁹⁵

Ein weiter detaillierter Änderungsprozess ist von JARRATT ET AL.⁹⁶ definiert (siehe Abbildung 2-6). Der generische Ansatz für den Prozessablauf einer technischen Änderung nach JARRATT ET AL. wird zeitlich in Abhängigkeit vom Genehmigungsstand in drei Phasen unterteilt. Der erste Abschnitt wird dadurch charakterisiert, dass noch keine Entscheidung darüber getroffen wurde, ob die technische Änderung durchgeführt wird. Im Anschluss findet die Entscheidung über die Genehmigung statt, bevor die Konkretisierung der Prozessschritte erfolgt.⁹⁷ Somit folgt dieser Prozess weitestgehend dem von LINDEMANN ET AL.⁹⁸ Jedoch werden die genannten Phasen in kleinere Prozessschritte unterteilt.

⁹⁴ Vgl. Jarratt et al. (2005), Engineering change management // Design process improvement; Augustin (2015), Kooperatives Änderungsmanagement; Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre; Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen

⁹⁵ Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

⁹⁶ Vgl. Jarratt et al. (2005), Engineering change management // Design process improvement, S. 268

⁹⁷ Vgl. Jarratt et al. (2005), Engineering change management // Design process improvement, S. 272

⁹⁸ In Anlehnung an Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 261

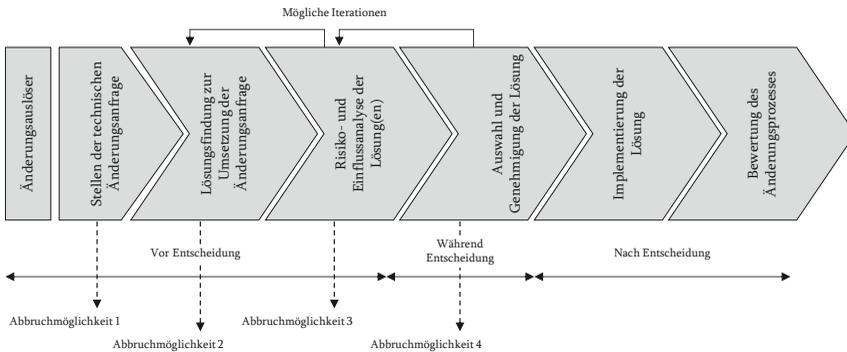


Abbildung 2-6: Änderungsprozess nach JARRATT ET AL.⁹⁹

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des Änderungsprozesses detailliert beschrieben:

Stellen der technischen Änderungsanfrage: Nachdem der Änderungsprozess durch einen Auslöser angestoßen wurde, muss ein Änderungsanfrage erstellt und eingereicht werden. Die meisten Unternehmen verwenden hierfür Standardformulare, die eine Beschreibung der Änderung enthalten (Änderungsgrund, Änderungsart, Priorität, beeinflusste Komponenten etc.).

Abbruchmöglichkeit 1: Die erste Abbruchmöglichkeit stellt sicher, dass nur die Änderungsanträge weiterverfolgt werden, die zu einem tatsächlichen Mehrwert führen. In produzierenden Unternehmen kommt es zu einer großen Menge an Änderungsanträgen aus dem Mitarbeiterkreis, die direkt am Anfang des Prozesses filtriert werden müssen.

Lösungsfindung zur Umsetzung der Änderungsanfrage: In diesem Schritt werden potenzielle Lösungsmöglichkeiten für das Problem gesucht. Dabei wird aufgrund von Zeit- und Kostendruck oder der „Offensichtlichkeit der Lösung“ häufig nur eine Lösungsvariante näher untersucht.

Abbruchmöglichkeit 2: Ergibt der zweite Prozessschritt, dass entgegen den Erwartungen keine sinnvolle Lösungsmöglichkeit für den Änderungsanfrage besteht, kann der Prozess abgebrochen werden.

Risiko und Einflussanalyse der Lösung(en): Im dritten Prozessschritt werden Risiken und Einflüsse der betrachteten Lösungsmöglichkeiten analysiert. Hierbei kann es sich um Auswirkungen auf Konstruktion, Produktionspläne, Zuliefererbeziehungen oder

⁹⁹ In Anlehnung an Jarratt et al. (2005), Engineering change management // Design process improvement, S. 272

Budgetpläne handeln. Außerdem sollten Aufwand und Nutzen der Lösung(en) bestimmt werden.

Abbruchmöglichkeit 3: Bergen die Lösungsmöglichkeiten zu hohe Risiken, kann an dieser Stelle ein Prozessabbruch eingeleitet oder zurück zum zweiten Prozessschritt gesprungen werden. Dabei muss der Verantwortliche der technischen Änderungen entweder den Prozessabbruch begründen oder neue Lösungen zur Umsetzung der technischen Änderung anfordern.

Auswahl und Genehmigung der Lösung: Nach der Entscheidung für eine Lösungsmöglichkeit findet die Genehmigung durch einen einberufenen Arbeitskreis statt. Dieses Komitee enthält Mitglieder aus verschiedenen Unternehmensbereichen, die alle ihre Präferenzen einfließen lassen. Eine zuvor durchgeführte Kosten-Nutzen-Analyse sollte als Grundlage der Entscheidung in der Entscheidungsvorlage enthalten sein.

Abbruchmöglichkeit 4: Nach Einberufung des Arbeitskreises existiert eine letzte Möglichkeit, den Änderungsprozess abzubrechen. Ebenso kann entschieden werden, eine erneute Risikoanalyse durchzuführen.

Implementierung der Lösung: Im nächsten Schritt werden die Änderungen durch die betroffenen Abteilungen umgesetzt. Dies erfolgt je nach Situation zeitverzögert oder direkt nach Freigabe der technischen Änderung.

Bewertung des Änderungsprozesses: Nach einer gewissen Zeitspanne ist zu prüfen, ob die Änderung zu der angestrebten Verbesserung geführt hat und welche Lehren für zukünftige Änderungsbegehren gezogen werden können.

Das vorgestellte generische Prozessmodell zeichnet sich dadurch aus, dass es branchenunabhängig einsetzbar ist. Die einzelnen Arbeitsschritte müssen in Bezug auf ein konkretes Unternehmen allerdings weiter spezifiziert werden. Insbesondere die Bewertung des Änderungsprozesses liefert dabei wichtige Informationen für zukünftige Änderungen, welche in Form von Daten für die Analyse und Prognose von Änderungsaufwänden genutzt werden können.

Ein weiteres – insbesondere in der Automobilbranche – weit verbreitetes Prozessmodell wird von AUGUSTIN ET AL. beschrieben. AUGUSTIN ET AL. stellen den Änderungsprozess nach VDA 4965 allgemein und vereinfacht dar (siehe Abbildung 2-7).¹⁰⁰ Die Informationen während Identifikation, Lösungserarbeitung und Analyse werden im Engineering Change Request (dt. = technische Änderungsanfrage) hinterlegt. Auf dieser Basis wird die Entscheidung über die Umsetzung der technischen Änderung getroffen. Ist die Entscheidung, dass eine Änderung umgesetzt wird, getroffen, erfolgt der Engineering Change Order (dt. = technischer Änderungsauftrag) zur Durchführung der Änderung. Schließlich müssen auch die Produktion und Fertigung angepasst werden.

¹⁰⁰ Vgl. Augustin (2015), Kooperatives Änderungsmanagement, S. 7

Die hier beschriebenen Phasen finden sich ebenfalls im bereits beschriebenen Änderungsprozess nach JARRATT ET AL. und unterstreichen somit die Allgemeingültigkeit des vorgestellten Prozesses. Für weitere Details hinsichtlich des Änderungsprozesses nach AUGUSTIN ET AL. sei hier auf die VDA 4965, Teil 0¹⁰¹ und Teil 1¹⁰², verwiesen. Im Rahmen der Automobilindustrie wird hier besonders die Zusammenarbeit mit externen Prozesspartnern der Supply-Chain untersucht.¹⁰³ Da dies nicht der Fokus der vorliegenden Arbeit ist, werden diese Inhalte nicht weiter detailliert.

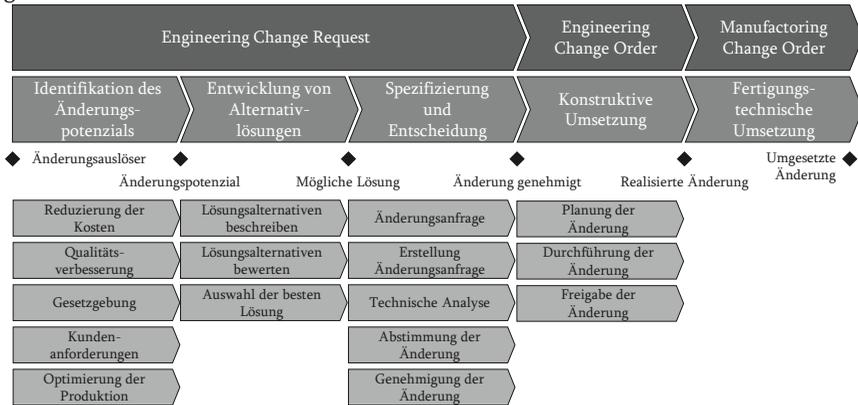


Abbildung 2-7: Änderungsprozess basierend auf VDA 4965¹⁰⁴

Neben den vorgestellten existieren weitere Änderungsprozesse. In allen im Zuge der Arbeit betrachteten Änderungsprozessen ist die Bewertung und Entscheidungsfindung für eine technische Änderungsanfrage als Prozessschritt enthalten.¹⁰⁵ Diese Phase gilt es durch die vorliegende Arbeit zu unterstützen.

Die vorgestellten Änderungsprozesse wurden in einer Arbeit von WICKEL ET AL.¹⁰⁶ durch die Analyse des Änderungsprozesses von sieben Unternehmen empirisch validiert. Die Unternehmen stellten dabei einen Querschnitt durch die produzierende Industrie dar, indem sich sowohl mittelständische Unternehmen als auch Zulieferer und

¹⁰¹ Vgl. Verband der Automobilindustrie (2010), ECM Recommendation Part 0

¹⁰² Vgl. Verband der Automobilindustrie (2010), ECM Recommendation Part 1

¹⁰³ Vgl. Augustin (2015), Kooperatives Änderungsmanagement, S. 7

¹⁰⁴ In Anlehnung an Augustin (2015), Kooperatives Änderungsmanagement, S. 7

¹⁰⁵ Vgl. Huang et al. (1999), Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries; Köhler (2010), Technische Produktänderungen; Kissel et al. (2013), System architecture change decisions in multi-variant product portfolios

¹⁰⁶ Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes

OEMs beteiligten.¹⁰⁷ Basierend auf diesen Erkenntnissen leiten WICKEL ET AL. einen Referenzprozess für technische Änderungen her.¹⁰⁸ Innerhalb dieses Referenzprozesses können fünf Phasen unterschieden werden (siehe Abbildung 2-8).

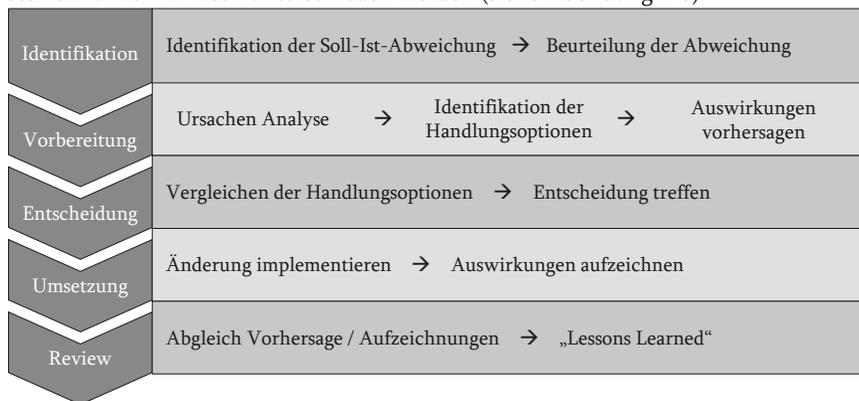


Abbildung 2-8: Referenzänderungsprozess nach WICKEL ET AL.¹⁰⁹

Bei der Betrachtung der vorgestellten Prozessmodelle für technische Änderungen ist festzuhalten, dass die Hauptforschungsfrage der vorliegenden Arbeit der Vorbereitung der Entscheidung und der Entscheidung selbst zuzuordnen ist. Damit eine Entscheidung für oder gegen die Umsetzung einer technischen Änderung getroffen werden kann, muss diese bewertet werden. Innerhalb dieser Bewertung müssen die Auswirkungen der Änderungen untersucht und eine Aufwand-Nutzen-Analyse durchgeführt werden. Hierzu wird im folgenden Kapitel das Thema der Bewertung von technischen Änderungen adressiert.

2.2.3 Bewertung von technischen Änderungen

In Teilkapitel 2.2.2 wurden unterschiedliche technische Änderungsprozesse vorgestellt, wobei der Fokus für die vorliegende Arbeit auf die Phase der Entscheidungsfindung, vor und während der Genehmigung einer Änderung, gelegt wurde. Für die Entscheidungsfindung bezüglich der Umsetzung von technischen Änderungsanfragen ist daher eine Bewertung der technischen Änderung notwendig. Innerhalb des Teilkapi-

¹⁰⁷ Vgl. Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, S. 127

¹⁰⁸ Vgl. Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, S. 130

¹⁰⁹ In Anlehnung an Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, S. 130ff.

tels werden nachfolgend die Gründe und Auswirkungen technischer Änderungen detailliert. Basierend darauf müssen anschließend Aufwand und Nutzen bestimmt werden.

Zur Bewertung technischer Änderungen ist es zu Beginn notwendig, diese mithilfe von Merkmalen und Ausprägungen zu beschreiben.¹¹⁰ Dabei existieren bereits unterschiedliche Beschreibungen in Form von Klassifikationen für technische Änderungen in der Literatur. Ansätze hierzu liefern bspw. AßMANN, BELENER, EVERSHEIM ET AL., GEMMERICH, GILLE, KAISER und KISSEL ET AL.¹¹¹

Basierend auf diesen Ansätzen lassen sich insbesondere die folgenden übergreifenden Merkmale zur Bewertung von technischen Änderungen unterscheiden:

Grund der technischen Änderungen

Generell kann zwischen der Ursache und der Auswirkung von technischen Änderungen unterschieden werden. Bei der Ursache technischer Änderungen wird insbesondere zwischen zwingenden Gründen und wirtschaftlichen Gründen unterschieden.¹¹² Andere Autoren nennen diese Gründe auch Muss- oder Kann-Änderungen.¹¹³ Insbesondere Änderungen, welche den wirtschaftlichen bzw. den Kann-Änderungen zugeordnet werden, sind hinsichtlich der Bewertung interessant. Eine wirtschaftliche Bewertung dieser Änderungen und eine mögliche Vermeidung der Änderungsdurchführung, falls sie keinen wirtschaftlichen Mehrwert bietet, ist daher ratsam.¹¹⁴

Zu den typischen Gründen von Kann-Änderungen gehören Maßnahmen zur internen Kostenreduktion oder zur Funktionsoptimierung eines Produktes oder Prozesses. Dagegen sind die Gründe für sogenannte Muss-Änderungen eine unzureichende Funktionserfüllung oder eine fehlerhafte Produktdokumentation. Eine Unterlassung

¹¹⁰ Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung, S. 92; Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 230

¹¹¹ Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung; Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse; Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen; Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen; Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte; Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst; Kissel et al. (2013), System architecture change decisions in multi-variant product portfolios

¹¹² Vgl. Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 109; Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 53f.

¹¹³ Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung; Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse, S. 36

¹¹⁴ Vgl. Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 11

verhindert, dass das Produkt erfolgreich am Markt platziert werden kann, oder führt zum Verstoß gegen gesetzliche Richtlinien.¹¹⁵

Neben den Ursachen von technischen Änderungen sind für die Bewertung vor allem die Auswirkungen der Umsetzung der technischen Änderungen interessant. Hierbei wird in der Literatur zwischen den Auswirkungen von technischen Änderungen auf das Produkt, den Prozess, die Ressourcen sowie Zeit und Kosten unterschieden.¹¹⁶ Außerdem führen technische Änderungen zu einer Steigerung der Produktqualität.¹¹⁷

Auswirkung auf das Produkt

Die Auswirkung von technischen Änderungen auf das Produkt umfassen entweder das Produkt selbst, dessen Dokumentation oder die Auswirkungen auf andere Produkte. Bei einer technischen Änderung wird immer eine Steigerung der Produktqualität, der Funktionalität oder die verbesserte Erfüllung von Kundenbedürfnissen angestrebt.¹¹⁸ GEMMERICH führte in diesem Kontext eine Fallstudie bei 25 Unternehmen aus der Automobilindustrie, dem Maschinenbau, der Metallverarbeitung und der Elektroindustrie durch. Die Studie ergab, dass die häufigste Auswirkung auf das Produkt eine Änderung der Bauteilgeometrie ist.¹¹⁹ Die Umsetzung einer technischen Änderung kann zu einer Vielzahl von Effekten auf den Entwicklungs- und den Produktionsprozess führen. Nach einer Studie von ROWELL ET AL. wurden aus 100 Änderungsanträgen insgesamt 209 unterschiedliche Maßnahmen für das Produkt abgeleitet.¹²⁰ Ebenso können technische Änderungen an einer Komponente einen erheblichen Einfluss auf andere Produktkomponenten haben. Bezüglich der Propagation von technischen Änderungen stellen ECKERT ET AL. fest, dass vier Verhaltensweisen existieren:¹²¹

Konstantes Propagationsverhalten: Bei der konstanten Propagation kommt es weder zu einer Absorption noch zu einer Ausbreitung der technischen Änderung auf andere Komponenten.

Absorbierendes Propagationsverhalten: Eine Komponente löst selbst weniger technische Änderungen an anderen Bauteilen aus, als sie durch andere Komponenten erhält.

Übertragendes Propagationsverhalten: Eine Komponente absorbiert genauso viele Änderungen, wie sie auslöst.

¹¹⁵ Vgl. Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 179ff.

¹¹⁶ Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 16f.

¹¹⁷ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 18f.

¹¹⁸ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 18f.

¹¹⁹ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 96

¹²⁰ Vgl. Rowell et al. (2009), The nature of engineering change in a complex product development cycle, S. 5

¹²¹ Vgl. Eckert et al. (2004), Change and customisation in complex engineering domains, S. 12

Vervielfachendes Propagationsverhalten: Eine Komponente generiert mehr technische Änderungen, als sie aufnimmt.

Die Fortpflanzung von Änderungen hat eine besondere Bedeutung für den Umsetzungsaufwand, da vervielfachendes Propagationsverhalten einen deutlich höheren Aufwand nach sich ziehen kann als konstantes Propagationsverhalten.

Auswirkung auf Prozesse und Ressourcen

Technischen Änderungen wirken sich auf unterschiedliche Art auf den Produktentstehungsprozess aus. Durch die Änderungsdurchführung müssen häufig Aktivitäten entlang des Produktentwicklungsprozesses erneut durchgeführt werden. Weiterhin können veränderte Produkteigenschaften zu einer Beeinflussung der Prozesse insbesondere im Bereich der Produktion führen, da bspw. veränderte Fertigungsverfahren genutzt werden müssen. Mit den prozessualen Änderungen verbunden ist die veränderte Nutzung von Ressourcen (z. B. Humanressourcen, EDV, Anlagen, Betriebsmittel, Kapital), weshalb die Auswirkungen auf Prozesse und Ressourcen im Folgenden zusammen betrachtet werden.¹²²

Nach GEMMERICH sorgen Änderungen an betriebsinternen Prozessen dafür, dass Kapazitäten und Ressourcen nahezu aller Unternehmensbereiche, insbesondere jedoch die Bereiche, die den Materialfluss im Unternehmen regeln (Beschaffung, Lagerung, Produktion, Vertrieb), die Produktionssteuerung oder die Entwicklung und Konstruktion, zur Verfügung gestellt werden müssen. Diese Ressourcen sind häufig bereits an anderer Stelle verplant, so dass die laufenden Prozesse gestört werden.¹²³ In einer Studie stellte GEMMERICH fest, dass 22% aller technischen Produktänderungen ebenfalls zu Änderungen an Betriebsmitteln führten. Daraus folgen weitere Anpassungen von bspw. Prozessplänen, Arbeitsplänen, Prüfanweisungen und Dokumentationen.¹²⁴

¹²² Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 18

¹²³ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 97ff.

¹²⁴ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 96

Auswirkung auf Zeitpläne

Eng verbunden mit den Auswirkungen auf Prozesse sind die Auswirkungen auf Termin- und Zeitpläne, da sich Veränderungen an Prozessen häufig in Zeit- und Kostenauswirkungen äußern.¹²⁵

Ein besonders relevanter zeitlicher Aspekt in der heutigen strategischen Unternehmensausrichtung ist die Time-to-Market (TTM) eines Produkts. Sie gibt die Zeitspanne an, die ein Produkt von der F&E bis zur Markteinführung durchläuft. Besonders bei kurzen Produktlebenszyklen (PLZ) sorgt eine kurze TTM für Marktvorteile, da Konkurrenten womöglich noch kein entsprechendes Konkurrenzprodukt anbieten.¹²⁶ Im Kontrast zu einer kurzen TTM stehen technische Änderungsprozesse innerhalb des Produktentstehungsprozesses, welche den F&E-Prozess verzögern und somit zu negativen Kosteneffekten (z. B. Opportunitätskosten entgangener Gewinne, Lagerkosten, Kapitalbindungskosten) führen.¹²⁷

LANGER ET AL. konstatieren, dass eine technische Änderung vom Erkennen des Änderungsbedarfs bis zur fertiggestellten Umsetzung durchschnittlich 25,5 Arbeitstage in Anspruch nimmt und durchschnittlich 43% der am Produktentwicklungsprozess beteiligten Arbeitskräfte bindet. Im Falle einer kritischen Änderung steigen die Werte auf durchschnittlich 39,8 Arbeitstage und durchschnittlich 75,6% der Arbeitskräfte an.¹²⁸ Lange Durchlaufzeiten bergen außerdem die Gefahr von Informationsasymmetrien aufgrund unterschiedlicher Informationsstände. Dies kann zu weiteren Verzögerungen in späteren Phasen des PLZ führen, wenn sich bspw. ein Bauteil nicht montieren lässt und eine erneute Anpassung stattfinden muss.¹²⁹

Auswirkung auf Kosten

Neben den Auswirkungen von technischen Änderungen auf Ressourcen und Zeitpläne sind die direkten Kosten bzw. Einzelkosten einer technischen Änderung zu ermitteln. PFLICHT fasst diese in die Kategorien Änderungsdurchführungskosten und Sondereinzelkosten der Fertigung zusammen. Unter den Änderungsdurchführungskosten werden Kosten, die direkt mit der Durchsetzung der Änderung verknüpft sind, wie bspw. Kosten für Nacharbeit, Änderungsplanung in der Konstruktion, Verschrottung und

¹²⁵ Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

¹²⁶ Vgl. Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 69f.

¹²⁷ Vgl. Zanner (2002), Management inkrementeller Dienstleistungsinnovation, S. 56

¹²⁸ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 10

¹²⁹ Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 22f.

Umbau von Produkten, zusammengefasst. Kosten für Neuanfertigungen und Änderungen von Betriebsmitteln, Programmen oder Werkzeugen fallen unter die Sondereinzelkosten der Fertigung.¹³⁰

Neben den direkten Kosten existieren die indirekten Kosten technischer Änderungen. Diese werden häufig auch als Opportunitätskosten bezeichnet. Hierin sind neben den Schäden durch Rufverlust auch nicht realisierte Gewinne durch den Verlust von Absatzpotenzialen sowie Konventionalstrafen und Änderungsgemeinkosten enthalten.¹³¹ Die Kosten technischer Änderungen sind von HAMRAZ und LANGER ET AL. klassifiziert worden (siehe Abbildung 2-9).

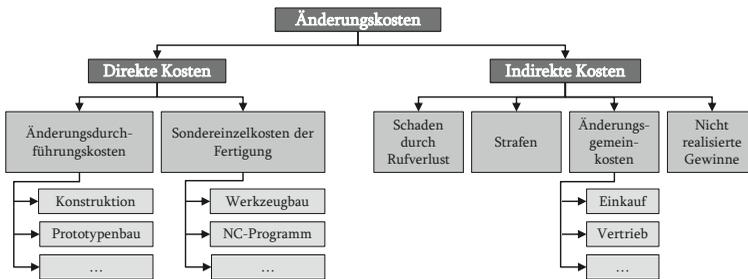


Abbildung 2-9: Klassifizierung von Änderungskosten nach HAMRAZ¹³²

LANGER ET AL. führten in ihrer Studie eine zeitliche Klassifizierung interner Änderungskosten in Kosten für die Änderungsumsetzung, Kosten nach der Änderungsumsetzung und langfristige Kosten durch. Die Auswertung besagt, dass 82% aller technischen Änderungen während ihrer Umsetzung für ansteigende Kosten sorgten. Langfristig sorgten aber über 30% der Änderungen für Kosteneinsparungen, was belegt, dass technische Änderungen ein Mittel zur Kostenreduktion im Unternehmen sein können.¹³³

Wie hoch die resultierenden Kosten einer Änderung sind, hängt ebenfalls maßgeblich von der Dringlichkeit der Umsetzung ab. Sofortänderungen sorgen für deutlich höhere Kosten als Änderungen, die in einem planmäßigen Intervall durchgeführt werden.¹³⁴

¹³⁰ Vgl. Pflicht (1989), Technisches Änderungswesen in Produktionsunternehmen, S. 66, zitiert nach Conrat Niernerg (1997), S. 145.

¹³¹ Vgl. Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme, S. 28

¹³² In Anlehnung an Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme, S. 28f.

¹³³ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 22f.

¹³⁴ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 101

Aus diesem Grund ist eine Bündelung von Änderungen zur Reduktion von Änderungskosten eine in der Praxis eingesetzte Strategie.¹³⁵

Auswirkung auf die Qualität

Eine positive Eigenschaft technischer Änderungen ist die Möglichkeit, zusätzlichen Kundennutzen zu schaffen und damit zeitintensivere Neuentwicklungen zu ersetzen. Hierdurch wird die Produktqualität gesteigert und die Attraktivität des Produktes für den Kunden erhöht. Infolgedessen wird der PLZ des bestehenden Produkts verlängert, was längere Entwicklungszeiten für Nachfolgeentwicklungen oder andere Produktbereiche ermöglicht.¹³⁶ In diesem Zusammenhang wird häufig der Begriff des Release-Managements verwendet.

Zusammenfassend beschreibt das Unterkapitel 2.3 unterschiedliche Gründe und Auswirkungen von technischen Änderungen hinsichtlich Kosten, Zeit, Qualität, Prozess und Ressourcen sowie des Produkts selbst. Diese Informationen werden entlang des Änderungsprozesses in Form von Dokumenten oder Daten in EDV-Systemen festgehalten. Die Daten von technischen Änderungen, welche während des Änderungsprozesses entstehen, werden im folgenden Teilkapitel dezidiert vorgestellt, da sie die Grundlage zur Vorhersage von Änderungsaufwänden bilden.

2.2.4 Dokumentation von technischen Änderungen

Die Dokumentation von technischen Änderungen entlang des Änderungsprozesses und die dadurch generierten Daten bilden die Grundlage der Datenanalyse zur Minimierung der Gesamtänderungskosten technischer Änderungen. In diesem Teilkapitel werden die entstehenden Daten durch technische Änderungen sowie die bei der Durchführung des Änderungsprozesses aufgenommenen Daten vorgestellt.

Änderungsdaten stehen maßgeblich deshalb zur Verfügung, weil strenge gesetzliche Auflagen dies fordern.¹³⁷ Generell muss für technische Änderungen dokumentiert werden, wer wann was gemacht hat, damit eine Rückverfolgbarkeit gewährleistet ist. Dies gilt insbesondere im Zusammenhang mit Zertifizierungsverfahren und bei sicherheitsrelevanten Komponenten oder Prozessen.¹³⁸ Dabei kann zwischen zwei Arten von Daten unterschieden werden. Nach LINDEMANN ET AL. werden die Änderungsdaten wie folgt definiert:

¹³⁵ Vgl. Aleksic (2015), Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management, S. 43ff.

¹³⁶ Vgl. Zanner (2002), Management inkrementeller Dienstleistungsinnovation, S. 56f.

¹³⁷ Vgl. Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre, S. 103f.

¹³⁸ Vgl. Gilsdorf (2011), Semantic annotation of product safety information, S. 1f.

„Änderungsdaten sind alle bei einer Änderung entstehenden Daten, die technische Änderungen beschreiben. Hierzu zählen insbesondere Änderungsattribute (z.B. Änderungsursachen, -auslöser und Zeitpunkt), der Umfang der Änderung (z.B. Bauteile, Baugruppen, Zeichnungen) und Auswirkungen (z.B. Änderungskosten, -dauer)¹³⁹.

Im Unterschied dazu sind die Änderungsprozessdaten nach LINDEMANN ET AL. definiert als:

„Änderungsprozessdaten sind alle bei einer Änderung entstehenden prozessbezogenen Daten. Insbesondere wer (z.B. involvierter Mitarbeiter und Unternehmensbereich) wann (z.B. Zeitstempel, Phase im Entwicklungsprozess) welche Aktivität vorgenommen hat¹⁴⁰.

Die Daten werden hierbei häufig in standardisierten Änderungstemplates innerhalb eines Unternehmens erfasst.¹⁴¹ Die Erfassung dieser Änderungsdaten und Änderungsprozessdaten ist unternehmensübergreifend i.d.R. nicht standardisiert. Da Änderungen jedoch häufig nicht nur singular in einzelnen Unternehmen auftreten, sondern entlang einer Supply-Chain, sind unterschiedliche Modelle zum Austausch von Änderungsdaten entwickelt worden. So stellt MEHTA im „Standard for the Exchange of Product Model Data“ (STEP) nach ISO/IS 10303-1 benötigte Informationen einer technischen Änderungsanfrage dar (siehe Abbildung 2-10).¹⁴² Hierbei sind alle relevanten Informationen zu Produktdaten und Dokumenten vorhanden, welche bei einem unternehmensübergreifenden Änderungsprozess identifiziert werden müssen.¹⁴³ Für eine detaillierte Beschreibung der Elemente ist hier auf die ISO/IS 10303-1¹⁴⁴ verwiesen.

¹³⁹ Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 27

¹⁴⁰ Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 27

¹⁴¹ Vgl. Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 152f.

¹⁴² Vgl. Mehta (2010), Knowledge-based Methods for Evaluation of Engineering Changes, S. 6

¹⁴³ Vgl. Wasmer et al. (2011), An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing, S. 537

¹⁴⁴ ISO ISO/DIS 10303-1. (2020), Industrial automation systems and integration

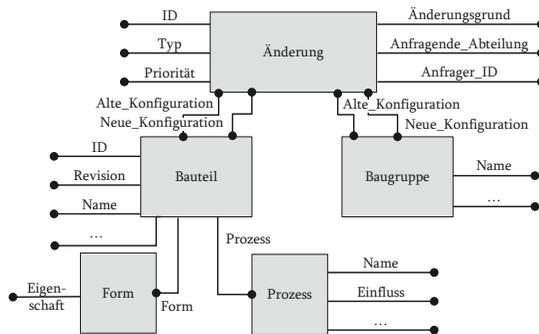


Abbildung 2-10: Ausschnitt des STEP-Modells nach MEHTA¹⁴⁵

Änderungsdaten und Änderungsprozessdaten können innerhalb der Unternehmen in unterschiedlichen IT-Systemen vorliegen. Sie sind insbesondere notwendig, um die Aufgaben des Änderungsmanagements durch einen digitalen Prozess zu unterstützen.¹⁴⁶ Die zentralen Aufgaben von IT-Werkzeugen für technische Änderungen werden nach Langer in die Datenhandhabung, Informationsverteilung und Workflowunterstützung unterteilt.¹⁴⁷ Für die datenbasierte Vorhersage von Änderungsaufwänden ist insbesondere die Datenhandhabung von Bedeutung. Daten werden entweder in PLM-Systemen (bspw. Siemens Teamcenter), ERP-Systemen (bspw. SAP) oder in dedizierten Software-Tools (bspw. Mastermind) für das Änderungsmanagement erzeugt und gespeichert.¹⁴⁸ Unabhängig vom verwendeten IT-System ist prinzipiell die Verwaltung der Daten in unterschiedlichen Systemen möglich. Neben den Informationen über die Änderungen selbst werden insbesondere ERP-Systeme auch für die Dokumentation des Ressourcenverbrauchs verwendet.¹⁴⁹ Die verwendeten Ressourcen werden dabei Kostenstellen zugewiesen.¹⁵⁰ Hierdurch ist eine Verknüpfung von technischen Änderungen und den notwendigen Ressourcen zu deren Bearbeitung möglich. Mittels dieser Verknüpfung können Datensätze generiert werden, durch welche Aufwände technischer Änderungen mithilfe von Prognoseverfahren vorhergesagt werden können.¹⁵¹

¹⁴⁵ In Anlehnung an Mehta (2010), Knowledge-based Methods for Evaluation of Engineering Changes, S. 8

¹⁴⁶ Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 64

¹⁴⁷ Vgl. Langer (2016), Änderungsmanagement, S. 529

¹⁴⁸ Vgl. Köhler (2010), Technische Produktänderungen, S. 64

¹⁴⁹ Vgl. Kellner et al. (2020), Produktionswirtschaft, S. 148

¹⁵⁰ Vgl. Kellner et al. (2020), Produktionswirtschaft, S. 148

¹⁵¹ Vgl. Kellner et al. (2020), Produktionswirtschaft, S. 149

Mithilfe dieser Daten und neuartigen Analyseverfahren ergibt sich ein hohes Potenzial zur Effektivitäts- und Effizienzsteigerung für den Ablauf von technischen Änderungen.¹⁵² Die erhobenen Daten technischer Änderungen sowie die Änderungsprozessdaten werden im Kontext dieser Arbeit genutzt, damit zunächst technische Änderungen beschrieben und Grundtypen technischer Änderungen abgeleitet werden können (siehe Unterkapitel 5.1 und 5.2). Durch eine Kostenbeschreibung (siehe Unterkapitel 5.3) und eine Vorhersage von Kosten technischer Änderungen (siehe Unterkapitel 5.4) wird anschließend ein Entscheidungsmodell zur Minimierung der Gesamtänderungskosten entwickelt (siehe Unterkapitel 5.5). Die Grundlagen der dazu notwendigen Datenanalyse werden im folgenden Unterkapitel vorgestellt.

2.3 Datenanalyse

Nachdem in Unterkapitel 2.2 der Objektbereich der technischen Änderungen sowie die vorhandenen Änderungsdaten und Änderungsprozessdaten vorgestellt wurden, folgt in diesem Unterkapitel eine Beschreibung der Grundlagen zur Datenanalyse, welche in der vorliegenden Arbeit angewendet wird. Hierzu werden zu Beginn die relevanten Begrifflichkeiten definiert. Es folgt die Beschreibung eines Vorgehensmodells zur Datenanalyse. Abschließend wird explizit auf das Thema Data Mining, also das Gewinnen von Wissen aus Daten, eingegangen.

2.3.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten

Zu Beginn werden wichtige Begrifflichkeiten aus dem Bereich der Datenanalyse voneinander abgegrenzt. Ausgehend von der Definition des Begriffes Daten wird anschließend das Data Mining vorgestellt. Abschließend werden die im Data Mining verwendeten Begrifflichkeiten wie Statistik, Maschinelles Lernen und Künstliche Intelligenz präsentiert. Viele Begrifflichkeiten aus diesem Bereich werden häufig miteinander vermischt oder verwechselt.¹⁵³

Daten

Unter Daten werden die durch Beobachtungen, Erfahrungen oder statistische Erhebungen gewonnenen Fakten verstanden.¹⁵⁴ Diese können kategorisch oder numerisch

¹⁵² Vgl. Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, S. 59f.

¹⁵³ Vgl. Niebler et al. (2019), Datenbasiert entscheiden, S. 7

¹⁵⁴ Vgl. Ramesh et al. (2018), Business Intelligence, Analytics, and Data Science, S. 61

beschrieben und festgehalten werden.¹⁵⁵ Zu den kategorischen Daten gehören nominalskalierte Daten und ordinalskalierte Daten. Dahingegen werden intervallskalierte Daten, verhältnisskalierte Daten und absolut skalierte Daten den numerischen Daten zugeordnet.¹⁵⁶ Eine Ansammlung von mehreren Daten gleicher oder unterschiedlicher Skalierung wird als Datensatz bezeichnet, wobei Datensätze wiederum die Grundlage für die Datenanalyse bilden.¹⁵⁷

Data Mining

Data Mining beschreibt einen Prozess, der es erlaubt, Wissen aus Daten abzuleiten und dieses einem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Als Wissen werden dabei neue, nicht triviale Muster, Beziehungen und Trends innerhalb der Daten bezeichnet. Dabei kann sowohl Statistik als auch Maschinelles Lernen eingesetzt werden.¹⁵⁸

Statistik

Die Statistik wird in der Literatur als Formalwissenschaft beschrieben und ist ein Teilgebiet der Mathematik. Sie kann wiederum in die Teilgebiete der deskriptiven und induktiven Statistik unterteilt werden. Das Ziel der Statistik ist in beiden Fällen, quantitative Informationen auf Basis von Beobachtungen zu gewinnen.¹⁵⁹

Künstliche Intelligenz

Künstliche Intelligenz ist ein Teilgebiet der Strukturwissenschaft der Informatik. Sie beschreibt den Versuch, (künstlichen) Agenten rationales und intelligentes Denken zu ermöglichen. Hierzu existieren unterschiedliche Untergruppen wie bspw. das Maschinelle Lernen oder wissensbasierte Systeme.¹⁶⁰

Maschinelles Lernen

Maschinelles Lernen bildet eine Untergruppe von Künstlicher Intelligenz. Das Ziel von Maschinellern Lernen ist es dabei, aufgabenspezifisches Wissen zu generieren oder aufgabenspezifische Probleme zu lösen.¹⁶¹ Dabei bedient sich das Maschinelle Lernen

¹⁵⁵ Vgl. Tan et al. (2005), Introduction to data mining, S. 19

¹⁵⁶ Vgl. Tan et al. (2005), Introduction to data mining, S. 26

¹⁵⁷ Vgl. Tan et al. (2005), Introduction to data mining, S. 22

¹⁵⁸ Vgl. Fayyad et al. (1996), From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases, S. 41f.; Vgl. Chapman et al. (2000), CRISP-DM 1.0, S. 6ff.; Vgl. Witten et al. (2017), Data mining

¹⁵⁹ Vgl. Dietrich et al. (2014), Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, S. 36

¹⁶⁰ Vgl. Russell et al. (2010), Artificial intelligence, S. 1ff.; Vgl. Winston (1993), Artificial intelligence, S. 5ff.; Vgl. Turing (1950), Computing Machinery and Intelligence

¹⁶¹ Vgl. Russell et al. (2010), Artificial intelligence, S. 2f.; Vgl. Alpaydin (2010), Introduction to machine learning, S. 1ff.; Vgl. Mannila (1996), Data mining: machine learning, statistics, and databases, S. 2ff.

ebenfalls statistischer Werkzeuge, welche jedoch für die Lösung von spezifischen Aufgaben angewendet werden und dabei formale Anforderungen an statistische Auswertungen vernachlässigen.¹⁶²

Für die Anwendung von Data Mining, Künstlicher Intelligenz und Maschinellem Lernen existieren innerhalb der Forschung und Industrie unterschiedliche Prozessmodelle. Zu den bekanntesten Vertretern dieser Prozessmodelle gehören der Knowledge-Discovery-in-Data (KDD)-Prozess nach FAYYAD ET AL. sowie der Cross-Industry Standard Process in Data Mining (CRISP-DM), hier beschrieben nach CHAPMAN.¹⁶³ Diese werden im folgenden Teilkapitel detailliert vorgestellt.

2.3.2 KDD-Prozess und CRISP-DM

In diesem Teilkapitel werden die Prozessmodelle KDD und CRISP-DM vorgestellt. Einer der Hauptunterschiede zwischen den beiden Prozessmodellen bildet die Herkunft der Modelle. Während der KDD-Prozess in einem akademischen Umfeld entstanden ist, wurde CRISP-DM durch ein Industriekonsortium erarbeitet. Trotz der unterschiedlichen Herkunft der Prozessmodelle finden sich aber erhebliche Ähnlichkeiten. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte des KDD-Prozesses und des CRISP-DM vorgestellt. Anschließend werden diese miteinander verglichen und die Nutzung dieser Erkenntnisse im Zuge der vorliegenden Arbeit wird erläutert.

Der Begriff KDD wurde bereits 1991 von PIATETSKY-SHAPIRO ET AL. eingeführt, der noch heute meistzitierte KDD-Prozess wurde jedoch 1996 von FAYYAD ET AL. beschrieben und gliedert sich in die folgenden Prozessschritte (siehe Abbildung 2-11):¹⁶⁴

¹⁶² Vgl. Schuh et al. (2019), Data Mining Definitions and Applications for the Management of Production Complexity, S. 5

¹⁶³ Vgl. Fayyad et al. (1996), From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases, S. 40ff.; Schinzer et al. (1999), Data warehouse und data mining, S. 99; Alpar et al. (2000), Data Mining im praktischen Einsatz, S. 4; Ester et al. (2000), Knowledge Discovery in Databases, S. 1; Pal et al. (2004), Pattern recognition algorithms for data mining, S. 7; Schmitz (2015), Gestaltungsmethodik für eine Produktstruktur variantenreicher rotationssymmetrischer Bauteile, S. 81; Chapman et al. (2000), CRISP-DM 1.0

¹⁶⁴ Vgl. Fayyad et al. (1996), From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases, S. 40ff.

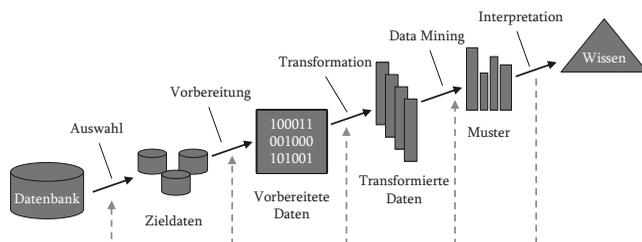


Abbildung 2-11: Darstellung des KDD-Prozesses¹⁶⁵

Auswahl: Ausgehend von den Daten muss eine Auswahl derselben getroffen werden, um ein Verständnis der Anwendungsdomäne und der Vorkenntnisse zu entwickeln. Ausgehend davon kann das Ziel des KDD-Prozesses identifiziert und formuliert werden. Nach der Auswahl sind die Zieldaten vorhanden.

Vorbereitung: Während der Vorbereitung wird ausgehend von den Zieldaten die Bereinigung, Vorbereitung und Aufbereitung der Daten durchgeführt. Außerdem wird Datenrauschen entfernt und der Umgang mit fehlenden Datenpunkten festgelegt. Nach der Vorbereitung sind vorbereitete Daten vorhanden.

Transformation: Die Transformation der Daten beinhaltet die Selektion und das Diskretisieren von Attributen. Weiterhin kann durch die Einschränkung der Dimensionen und die Anwendung von Transformationsmethoden die Anzahl der Variablen reduziert werden. Dies geschieht im Hinblick auf die Zielvorgabe des jeweiligen KDD-Prozesses. Abschließend liegen transformierte Daten zur weiteren Nutzung vor.

Data Mining: Basierend auf den transformierten Daten können geeignete Data-Mining-Methoden für das angestrebte Ziel angewendet werden. In dieser Phase finden die explorative Analyse sowie die Auswahl des Data-Mining-Algorithmus und der Modelle und Parameter statt. Eine genaue Vorstellung des Data Mining folgt in Teilkapitel 2.3.3

Interpretation/Evaluation: Die durch das Data Mining erkannten Muster werden genutzt, um das eingangs formulierte Ziel zu erfüllen. Hierzu müssen die Muster in geeigneter Form dargestellt werden. Abschließend sollten die Ergebnisse als neues Wissen zur Verfügung stehen.

¹⁶⁵ In Anlehnung an Fayyad et al. (1996), From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases

Zwischen den einzelnen Schritten sind Iterationen möglich. Der KDD-Prozess ist in seinem Feld der meistzitierte Prozess und hat als Vorbild für die Entwicklung weiterer Prozesse gedient.¹⁶⁶

Im Gegensatz zum KDD-Prozess ist CRISP-DM in der Industrie entstanden. Die Unternehmen DaimlerChrysler, NCR Systems Engineering Copenhagen, SPSS Inc. und OHRA gründeten im Rahmen eines EU-Projekts eine Special Interest Group und entwickelten in den Jahren 1996 bis 1999 die hersteller- und branchenübergreifende Methode für Data-Mining-Projekte.¹⁶⁷ Der CRISP-DM gliedert sich in sechs Schritte, welche iterativ durchlaufen werden können (siehe Abbildung 2-12):¹⁶⁸

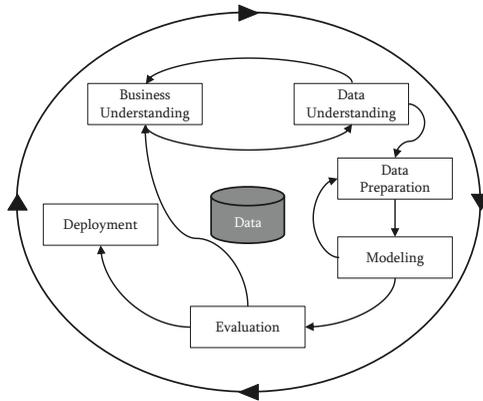


Abbildung 2-12: Darstellung des CRISP-DM¹⁶⁹

Business Understanding (Geschäftsverständnis): Hier werden Ziele und Anforderungen definiert, um das Wissen in eine Data-Mining-Problemstellung zu überführen.

Data Understanding (Datenverständnis): Die Daten werden zur Bewertung der Ist-Situation hinsichtlich der Problemstellung sowie der Datenqualität untersucht.

Data Preparation (Datenvorbereitung): Der Aufbau des Datensets für die Analyse findet durch Zusammenführung unterschiedlicher Datensätze, Bereinigung der Daten und Überführung in ein verwendbares Format statt

¹⁶⁶ Vgl. Kurgan et al. (2006), A survey of Knowledge Discovery and Data Mining process models, S. 12

¹⁶⁷ Vgl. Eisenberg (2004), Statistische Methoden des Data Mining und deren Anwendung, S. 14

¹⁶⁸ Vgl. Chapman et al. (2000), CRISP-DM 1.0, S. 10ff.

¹⁶⁹ In Anlehnung an Chapman et al. (2000), CRISP-DM 1.0

Modeling (Modellierung): Die Generierung von Wissen durch die Anwendung von Data-Mining-Algorithmen auf das bereitgestellte Datenset ermöglicht es, unerkannte Muster in den Daten zu entdecken und diese anschließend zu interpretieren.

Evaluation (Evaluation): Die kritische Bewertung des zuvor entwickelten Modells und der Ergebnisse des Data Mining ist notwendig, damit die Ergebnisse zielgerichtet genutzt werden können.

Deployment (Anwendung): Das Wissen, welches durch den Prozess entstanden ist, muss aufgearbeitet werden, damit es zur weiteren Verwendung bereitsteht.

Sowohl der KDD-Prozess als auch der CRISP-DM beschreiben ein Vorgehen, welches ausgehend von einer Fragestellung oder einer unternehmerischen Zielsetzung mithilfe von Data Mining versucht, ein Problem zu lösen und das dabei entwickelte Wissen weiter zu nutzen. In beiden Prozessen besteht ein hoher Aufwand für die Vorbereitung der Daten. Außerdem bildet das Data Mining den Kern der Prozesse, weshalb im nächsten Teilkapitel eine genauere Betrachtung notwendig ist.

2.3.3 Data Mining

Das Data Mining wird als Teilprozess des KDD-Prozesses sowie des CRISP-DM angesehen und bildet hier das Kernelement der Wissensgenerierung.¹⁷⁰ In Teilkapitel 2.3.1 wurde das Data Mining bereits definiert. Ziel des Data Mining ist es dementsprechend, Wissen in Form von neuen, nicht trivialen Mustern, Beziehungen und Trends innerhalb der Daten zu identifizieren.¹⁷¹ MÜLLER ET AL. bezeichnen das Vorgehen beim Data Mining als semiautomatisches Aufdecken von Mustern mittels Datenanalyseverfahren in meist sehr großen und hochdimensionalen Datenbeständen.¹⁷²

Die Ziele von Data Mining können in zwei Gruppen unterteilt werden. Es wird unterschieden zwischen der Deskription und der Prädiktion. Die Deskription bezeichnet dabei das Ziel, Muster (Korrelationen, Trends, Cluster, Trajektorien und Anomalien) abzuleiten, welche die zugrunde liegenden Beziehungen in den Daten beschreiben. Bei der Prädiktion ist es das Ziel, den Wert eines bestimmten Attributs basierend auf den Werten anderer Attribute vorherzusagen. Die Attribute, die vorherzusagen sind, werden dabei im Allgemeinen als Zielvariable oder abhängige Variable bezeichnet. Die zur Erstellung der Vorhersage verwendeten Attribute werden als erklärende oder unabhängige Variable bezeichnet.¹⁷³

¹⁷⁰ Vgl. Fayyad et al. (1996), *From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases*, S. 41f.; Vgl. Chapman et al. (2000), *CRISP-DM 1.0*, S. 6ff.

¹⁷¹ Vgl. Fayyad et al. (1996), *From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases*, S. 41f.

¹⁷² Vgl. Müller et al. (2013), *Business Intelligence*, S. 75

¹⁷³ Vgl. Tan et al. (2005), *Introduction to data mining*, S. 7

Zum Erreichen der vorgestellten Ziele werden verschiedene Methoden aus den Wissenschaftsbereichen der Statistik und der Künstlichen Intelligenz (insbesondere des Maschinellen Lernens) verwendet, welche bereits in Teilkapitel 2.3.1 definiert wurden.¹⁷⁴ Zu den bekanntesten Methoden aus diesen Bereichen zählen unterschiedliche Algorithmen zur Bestimmung von *Regression*, *Klassifizierung*, *Clustering* und *Assoziation*.¹⁷⁵ In der Praxis werden die Methoden von Data Mining häufig in unterschiedlichen Kombinationen eingesetzt, um die verschiedenen Ziele zu erreichen. Im Folgenden werden die relevantesten Methoden im Kontext dieser Arbeit vorgestellt.

Zur Erreichung des Ziels der Arbeit, der Bewertung technischer Änderung mittels prädiktiver Datenanalyse, müssen die existierenden Daten zuerst mithilfe von Clusterverfahren analysiert werden. Anschließend kann eine Prädiktion des Aufwands der technischen Änderungen durchgeführt werden. Weiterhin gilt es den Nutzen einer technischen Änderung zu bestimmen. Mithilfe dieser Werte kann eine technische Änderung hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Im Rahmen dieser Zielsetzung werden Prognoseverfahren basierend auf Maschinellern in Unterkapitel 2.4 dezidiert beschrieben.

Klassifikation

Bei der Klassifikation geht es darum, einen logischen Zusammenhang zwischen Eingangsdaten und nominellen Ausgangsdaten zu erzeugen, woraus wiederum eine Gleichung oder eine Regel abgeleitet werden kann. Um dies zu erzielen, werden markierte Daten verwendet, mit deren Hilfe Objekte in Klassen eingeteilt werden können. Hierzu existieren unterschiedliche Verfahren, wie bspw. die Naiver-Bayes-Klassifikation, die lineare Diskriminanz, die Support Vector Machine, die Nächster-Nachbar-Klassifikation, die lernende Vektorquantisierung und Entscheidungsbäume. Darauf aufbauend werden zahlreiche Klassifikationskriterien festgelegt. Zur Bewertung der Klassifikation werden häufig Paare dieser Kriterien verwendet, um bspw. Receiver-Operating-Curve-Diagramme oder Precision-Recall-Diagramme darzustellen.¹⁷⁶

Clustering

Beim Clustering wird versucht, die inhärenten Strukturen eines Datensatzes zu gliedern. Dies wird ermöglicht, indem der Datensatz in mehrere Untergruppen segmentiert wird, in welchen sich die Datensätze möglichst ähneln sollen. Dabei ist der zentrale Ansatz das sogenannte Distanzmaß. Hierbei soll die Ähnlichkeit zwischen zwei

¹⁷⁴ Vgl. Müller et al. (2013), Business Intelligence, S. 75; Runkler (2015), Data Mining, S. 2

¹⁷⁵ Backhaus et al. (2016), Multivariate Analysemethoden; Müller et al. (2013), Business Intelligence; Ester et al. (2000), Knowledge Discovery in Databases; Runkler (2015), Data Mining

¹⁷⁶ Vgl. Runkler (2015), Data Mining, S. 85ff.

Datenpunkten gemessen werden. Dazu stehen für die Anwendung verschiedene Distanzmaße zur Verfügung, welche in Abhängigkeit von der Fragestellung und der Struktur der Daten gewählt werden. Am häufigsten wird die euklidische Distanz verwendet.¹⁷⁷

Im Zuge der Arbeiten können Klassifikations- oder Clustering-Verfahren zum Einsatz kommen. Mithilfe dieser Verfahren kann die Ähnlichkeit zwischen Änderungen beschrieben werden. Für weitere Ausführungen hierzu sei an dieser Stelle auf das Unterkapitel 2.5 verwiesen.

Assoziieren

Das Assoziieren versucht interessante Beziehungen zwischen Variablen innerhalb von großen Datenmengen zu identifizieren. Dadurch wird es ermöglicht, Elemente zu finden, welche das Auftreten weiterer Elemente implizieren. Eines der bekanntesten Anwendungsgebiete stellt die Warenkorbanalyse beim Online-Shopping dar. Diese funktioniert auf Basis von Assoziationsregeln, welche zwei oder mehr Elemente in Verbindung miteinander setzen.¹⁷⁸

Regression

Die Regression befasst sich mit der iterativen Modellierung von Beziehungen zwischen Variablen. Bei der Regression geht es um die Abschätzung der funktionalen Abhängigkeiten zwischen einzelnen Merkmalen, mit dem Ziel, die Zusammenhänge zu verstehen. Im Allgemeinen wird bei der Regression zwischen der linearen und der nichtlinearen Regression unterschieden. Häufig wird die Regression verwendet, wenn eine quantitative Beschreibung der Zusammenhänge möglich ist oder aber die Werte der abhängigen Variablen zu prognostizieren sind.¹⁷⁹

Für alle hier aufgelisteten Methoden spielt das Maschinelle Lernen eine bedeutende Rolle. Generell nutzt das Data Mining verschiedene Algorithmen des Maschinellen Lernens, um die spezifischen Ziele der Wissensextraktion zu erreichen. Eine detaillierte Beschreibung des Maschinellen Lernens sowie der Anwendung von Maschinellern Lernen zur Erstellung von Prognosen folgt im nächsten Unterkapitel.

¹⁷⁷ Vgl. Ahmad et al. (2019), Survey of State-of-the-Art Mixed Data Clustering Algorithms, S. 31883f.

¹⁷⁸ Vgl. Chamoni et al. (2006), Analytische Informationssysteme, S. 276ff.

¹⁷⁹ Vgl. Runkler (2015), Data Mining, S. 67

2.4 Maschinelles Lernen als Prognoseverfahren

Im folgenden Unterkapitel wird auf die Besonderheiten des Maschinellen Lernens als Prognoseverfahren eingegangen, da dieses im Kontext der Arbeit als ein Lösungsvehikel zur Bewertung von technischen Änderungen genutzt wird. Wie in Unterkapitel 2.3 beschrieben, bildet das Maschinelle Lernen eine Untergruppe von Verfahren der Künstlichen Intelligenz.

2.4.1 Definition relevanter Begrifflichkeiten

Das Maschinelle Lernen kann unterschiedliche Algorithmen nutzen, um die spezifischen Ziele, in diesem Fall eine Prognose, zu realisieren. Ein Algorithmus bezeichnet dabei im Allgemeinen eine Arbeitsanweisung für einen Computer und kann im realen Leben am besten mit einem Kochrezept verglichen werden.¹⁸⁰ Ein Algorithmus stellt somit eine Folge von Anweisungen dar, welche ausgeführt werden müssen, um den vorhandenen Eingang in einen gewünschten Ausgang zu transformieren. Es existieren jedoch häufig für gleiche Aufgaben mehrere Algorithmen. Weiterhin müssen Algorithmen verschiedene Eigenschaften besitzen. Hierzu zählen Allgemeingültigkeit, Ausführbarkeit, Finitheit, Terminierung, Determiniertheit und Determinismus.¹⁸¹

Algorithmus

Algorithmen aus dem Bereich des Maschinellen Lernens werden häufig verwendet, um Prognosen durchzuführen. Hierbei handelt es sich um die Abbildung der Funktion $Y = f(X)$, um Vorhersagen von Y für neue X zu ermöglichen. Prognosen werden auch als prädiktive Modellierung oder prädiktive Analytik bezeichnet. Sie haben dabei das Ziel, eine möglichst genaue Vorhersage zu treffen. Durch das Erlernen einer Funktion (f) wird deren Form anhand der zur Verfügung stehenden Daten abgeschätzt. Eine Schätzung ist dabei immer fehlerhaft und nicht perfekt. Sie bildet die hypothetische beste Abbildung von Y bei gegebenem X.¹⁸²

Damit ein Algorithmus eine Prognose durchführen kann, muss dieser zu Beginn mit bestehenden Daten trainiert werden. Hierzu existieren unterschiedliche Lernverfahren: überwachtes Lernen, unüberwachtes Lernen und bestärkendes Lernen sowie unterschiedliche Mischformen.¹⁸³

¹⁸⁰ Vgl. Rimscha (2017), Algorithmen kompakt und verständlich, S. 3

¹⁸¹ Vgl. Rimscha (2017), Algorithmen kompakt und verständlich, S. 3f.; Hill (2016), What an Algorithm Is, S. 38f.; Knuth (1997), Art Of Computer Programming, Volume 1: Fundamental Algorithms (3rd Edition)

¹⁸² Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 11f.

¹⁸³ Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 16ff.

Überwachtes Lernen

Überwachtes Lernen benötigt Trainingsdaten in Form von klassifizierten Daten. Bei klassifizierten Daten muss zu jedem Eingabewert ein Ausgabewert existieren. Die Trainingsdaten liefern also sowohl die Ausgangssituation der Vergangenheit (Eingabewert) als auch das Ergebnis, welches erzielt wurde (Ausgabewert). Dabei muss sichergestellt werden, dass eine Verallgemeinerung des gelernten Wissens möglich ist. Das bedeutet, die gelernten Zusammenhänge werden auf neue Datensätze angewendet und müssen hierbei zu sinnvollen Ergebnissen führen. Ein reines Auswendiglernen der Zusammenhänge aus dem ersten Datensatz ist hierbei nicht zielführend. Das Ziel des überwachten Lernens liegt also darin, aus den bestehenden Daten allgemeine Regeln abzuleiten, mit welchen wiederum aus neuen Eingangsdaten neue Ausgaben generiert werden können. In diesem Zusammenhang spricht man davon, dass das Computerprogramm gelernt hat, Vorhersagen über künftige und bislang unbekannte Daten zu machen.¹⁸⁴

Unüberwachtes Lernen

Im Gegensatz zum überwachten Lernen benötigt das unüberwachte Lernen keine klassifizierten Daten. Der Algorithmus versucht hierbei in den Datensätzen Strukturen zu identifizieren und diese zu interpretierbaren Informationen umzuwandeln.¹⁸⁵ Hierbei geht es insbesondere um die Aufdeckung von durch den Menschen nicht wahrgenommenen Mustern.¹⁸⁶

Bestärkendes Lernen

Das Verfahren des bestärkenden Lernens ist der Natur nachempfunden und setzt auf Belohnung und Bestrafung. Im Vergleich zu den anderen Verfahren existiert zu Beginn kein optimaler Lösungsweg, sondern dieser muss iterativ durch das Trial-and-Error-Prinzip gefunden werden.¹⁸⁷ Damit besteht das Ziel dieses Lernverfahrens darin, die Konsequenz des eigenen Handelns zu realisieren und die Aktionen zu identifizieren, die zukünftig durchzuführen sind, um die Belohnung zu verbessern.¹⁸⁸

Im Kontext der Arbeit liegt der Fokus auf dem Verfahren des überwachten Lernens, da für die Bewertung von technischen Änderungen von klassifizierten Daten ausgegangen werden kann. Somit wird ein Algorithmus zur Prognose benötigt. Die Auswahl eines Algorithmus muss dabei anhand definierter Kriterien erfolgen, welche im folgenden Teilkapitel 2.4.2 spezifiziert werden.

¹⁸⁴ Vgl. Wittpahl (2019), Künstliche Intelligenz, S. 25f.

¹⁸⁵ Vgl. Wittpahl (2019), Künstliche Intelligenz, S. 26

¹⁸⁶ Vgl. Gentsch (2018), Künstliche Intelligenz für Sales, Marketing und Service, S. 38

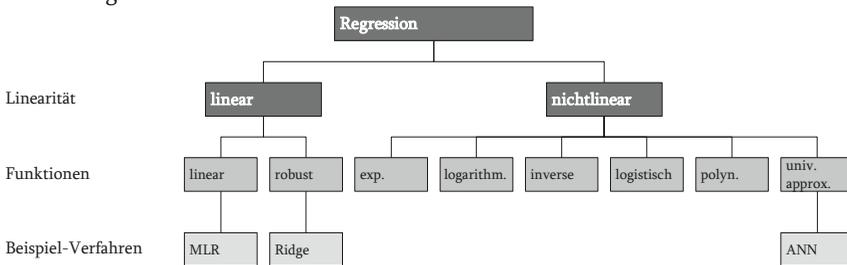
¹⁸⁷ Vgl. Gentsch (2018), Künstliche Intelligenz für Sales, Marketing und Service, S. 38f.

¹⁸⁸ Vgl. Wittpahl (2019), Künstliche Intelligenz, S. 29

2.4.2 Kriterien zur Auswahl eines Prognosealgorithmus

Eine Prognose kann durch unterschiedliche Algorithmen des Maschinellen Lernens erfolgen. In diesem Teilkapitel werden Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Algorithmus für das vorliegende Problem, die Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen, beschrieben. Diese Auswahl ist notwendig da grundsätzlich unterschiedliche Prognosealgorithmen für diese Aufgabe geeignet sind. Die gängigsten Regressionsverfahren werden im folgenden vorgestellt.

Zu Beginn muss die zu erfüllende Aufgabe durch den Algorithmus, hier die Prognose, bestimmt werden. Die Techniken Regression, Klassifikation, Assoziieren und Clustering sind bereits in Teilkapitel 2.3.3 beschrieben worden und sind je nach Aufgabenstellung anzuwenden. Für die vorliegende Aufgabe, die Vorhersage des Aufwands einer technischen Änderung, ist ein Regressionsalgorithmus erforderlich. Dieser kann mittels Maschinellern Lernen auf Basis von Vergangenheitsdaten eine Vorhersage hinsichtlich zukünftiger Aufwände liefern. Hier kann zwischen der linearen und nichtlinearen Regression unterschieden werden. Diese können wiederum in unterschiedliche Funktionen unterteilt werden (siehe Abbildung 2-13). Nichtlineare Verfahren finden immer dann Anwendung, wenn eine lineare Abhängigkeit zwischen den Attributen und der Zielvariable nicht angenommen werden kann.¹⁸⁹ Dies ist in der vorliegenden Arbeit der Fall. Daher ist ein nichtlineares Regressionsverfahren auszuwählen. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den universell approximierenden Regressionen, welche eine Verkettung von unterschiedlichen nichtlinearen Funktionen darstellen und daher sehr flexibel eingesetzt werden können.¹⁹⁰



exp.: exponentiell; logarithm.: logarithmisch; polyn.: polynomisch; univ. approx.: universell approximierend;
MLR: multiple lineare Regression; ANN: artificial neural networks

Abbildung 2-13: Regressionsverfahren¹⁹¹

¹⁸⁹ Vgl. Runkler (2015), Data Mining, S. 59f.

¹⁹⁰ Vgl. Runkler (2015), Data Mining, S. 74

¹⁹¹ In Anlehnung an Runkler (2015), Data Mining, S. 68; Cios et al. (2007), Data Mining, S. 347

Zu den bekanntesten Vertretern der universell approximierenden Regressionsverfahren gehören künstliche neuronale Netze, Support Vector Machine, Decision Tree Regression und Random-Forests.¹⁹²

Diese können anhand unterschiedlicher Kriterien bewertet werden.¹⁹³ Die Bewertungskriterien können dabei in Kriterien zur Handhabung der Eingabedaten und Kriterien zur Validierbarkeit der Ergebnisse unterschieden werden. Die hier vorgenommene Bewertung kann als allgemeine Indikation angesehen werden und kann aufgrund spezieller Eigenschaften der Eingabedaten und Algorithmen im Spezifischen Abweichen. Als Kriterien zum Vergleich der Handhabung von Eingabedaten können die folgenden genannt werden:

Toleranz gegenüber irrelevanten Werten

Irrelevante Werte unter den Daten können das Ergebnis der Regression negativ beeinflussen. Dieses Kriterium gibt an, in welchem Maße sich die Algorithmen durch irrelevante Werte beeinflussen lassen. Zu diesem Zweck wird die Korrelation zwischen der Anzahl an irrelevanten Werten und der Beeinflussung des Ergebnisses betrachtet. Bei einer geringen Anzahl an irrelevanten Werten in Kombination mit einer hohen Beeinflussung erhält man eine sehr geringe Toleranz gegenüber irrelevanten Werten. Für eine sehr hohe Toleranz bedarf es einer hohen Anzahl irrelevanter Daten, die jedoch nicht zu einer Beeinflussung des Ergebnisses führen. In diesem Fall hat die Anzahl irrelevanter Werte eine höhere Gewichtung als die Beeinflussung des Ergebnisses in Bezug auf die Toleranz.¹⁹⁴

Toleranz gegenüber kleinen Datensätzen

Die Toleranz gegenüber kleinen Datensätzen gibt an, wie relevant ein großer Datensatz für die Güte des Ergebnisses ist. Manche Verfahren kommen mit einer geringeren Menge an Instanzen aus und liefern trotzdem robuste Ergebnisse. Im Allgemeinen ist die benötigte Größe eines Datensatzes dabei insbesondere von der Anzahl der Einflussfaktoren abhängig. Mehr Einflussfaktoren führen hierbei zu einem größeren Datenbedarf.¹⁹⁵

¹⁹² Vgl. Dabab et al. (2018), A Decision Model for Data Mining Techniques, S. 7f.; Wu et al. (2008), Top 10 algorithms in data mining, S. 1ff.

¹⁹³ Vgl. Dabab et al. (2018), A Decision Model for Data Mining Techniques, S. 3

¹⁹⁴ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 351

¹⁹⁵ Vgl. Omary et al. (2010), Machine Learning Approach to Identifying the Dataset Threshold for the Performance Estimators in, S. 324f.

Toleranz gegenüber fehlenden Werten

Die Toleranz gegenüber fehlenden Werten beschreibt, wie gut ein Algorithmus mit nicht vorhandenen Daten innerhalb eines Datensets umgehen kann. Algorithmen können zum Teil sehr gut mit fehlenden Werten umgehen und werden von diesen nicht beeinflusst. Andere Algorithmen können nicht mit fehlenden Werten umgehen, so dass diese in der Phase der Datenvorbereitung entfernt oder ersetzt (bspw. durch den Median oder Mittelwert) werden müssen.¹⁹⁶

Verwendung nominaler Attribute

Die Verwendung nominaler Attribute beschreibt, ob ein Algorithmus auch mit nominalen Attributen arbeiten kann. Bestimmte Algorithmen des Maschinellen Lernens können jedoch nur ordinale oder kardinale Attribute verarbeiten.¹⁹⁷

Allgemeine Genauigkeit

Mit dem Kriterium der Genauigkeit wird der Algorithmus dahingehend beschrieben, wie genau die Antwort des Ergebnisses ausfallen kann. Hierbei werden Kennzahlen zusammengefasst, welche die Korrektheit der Ergebnisse kontrollieren. Je nach zu untersuchender Situation ist es nicht immer erforderlich, dass ein Ergebnis möglichst genau erfasst wird. In einigen Anwendungsfällen kann auch ein Näherungswert ausreichend sein. Je geringer die Genauigkeit sein muss, umso stärkere Näherungsmethoden können verwendet werden, was sich auf die Rechenzeit auswirken kann.¹⁹⁸

Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse

In Bezug auf die Bewertungslogik wird unter der Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse die Transparenz bezüglich der Funktionsweise und Regeln eines Algorithmus verstanden. Es wird bewertet, wie ersichtlich die Entscheidungsfindung für den Anwender ist. Zu diesem Zweck wird als Einflussfaktor die Verständlichkeit des Modells betrachtet. In diesem Kontext wird von Blackbox-Modellen oder Erklärungsmodellen gesprochen.¹⁹⁹

Resistenz gegen Overfitting

Overfitting beschreibt das Phänomen, dass ein trainierter Algorithmus sehr gute Ergebnisse für den Trainingsdatensatz liefert, bei neuen Daten jedoch eine hohe Abwei-

¹⁹⁶ Vgl. Kalousis et al. (2000), Supervised knowledge discovery from incomplete data, S. 269f.

¹⁹⁷ Vgl. Runkler (2015), Data Mining, S. 8f.

¹⁹⁸ Vgl. Kotsiantis (2007), Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques, S. 250f.

¹⁹⁹ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 351f.

chung aufweist. Dem Overfitting kann durch das Hinzufügen weiterer Daten entgegengewirkt werden, was jedoch nicht immer möglich ist. Im Allgemeinen weisen unterschiedliche Algorithmen unterschiedliche Resilienz gegenüber dem Overfitting auf.

Mittels der vorgestellten Bewertungskriterien kann ein geeigneter Prognosealgorithmus für das in dieser Arbeit beschriebene Problem, die Vorhersage von Änderungswänden ausgewählt werden.

Bewertungskriterien		1	2	3	4	5
		<i>sehr schlecht</i>	<i>schlecht</i>	<i>durchschnittlich</i>	<i>gut</i>	<i>sehr gut</i>
		Decision/ Regression Trees	Künstliche Neuronale Netze	Support Vector Machine	Random Forests	
Klassifikation/Regression/beides (K/R/B)		B	B	B	B	B
Handhabung von Eingabedaten	Toleranz gegenüber irrelevanter Werte	3	4	3	4	4
	Toleranz gegenüber kleinen Datensätzen	2	1	5	2	2
	Toleranz gegenüber fehlenden Werten	4	1	1	4	4
	Verwendung nominaler Attribute	5	2	2	5	5
Validierbarkeit der Ergebnisse	Allgemeine Genauigkeit	3	5	5	4	4
	Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	5	1	2	2	2
	Resistenz gegenüber Overfitting	1	2	2	3	3

Abbildung 2-14: Kriterien zur Auswahl eines Regressionsalgorithmus²⁰⁰

Auf Basis der hier beschriebenen Kriterien zur Auswahl von Algorithmen und den zuvor beschriebenen Regressionsalgorithmen kann der Random-Forest-Algorithmus als geeigneter Algorithmus für das vorliegende Problem ausgewählt werden (Abbildung 2-14). Der Random-Forest-Algorithmus wird auch in der Literatur als ein

²⁰⁰ In Anlehnung an Backus et al. (2006), Factory Cycle-Time Prediction With a Data-Mining Approach, S. 255; Dabab et al. (2018), A Decision Model for Data Mining Techniques, S. 3ff.; Kotsiantis (2007), Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques, S. 263; Meidan et al. (2011), Cycle-Time Key Factor Identification and Prediction in Semiconductor Manufacturing Using Machine Learning and Data Mining, S. 244

robustes, genaues und erfolgreiches Werkzeug zur Lösung einer Vielzahl von Aufgaben des Maschinellen Lernens dargestellt.²⁰¹ Im folgenden Teilkapitel erfolgt eine detaillierte Vorstellung des Random-Forest-Algorithmus.

2.4.3 Random-Forest-Algorithmus

Der Random-Forest-Algorithmus ist ein Verfahren aus dem Bereich des Maschinellen Lernens, welcher zur Klassifikation und zur Regression genutzt werden kann.²⁰² In der vorliegenden Arbeit ist nur die Regression relevant, weshalb diese in der Beschreibung des Random-Forrest-Algorithmus fokussiert wird.

Der Random-Forest-Algorithmus basiert auf der Arbeit von HO²⁰³, welcher mit seiner Forschung im Jahr 1995 den Grundstein hierzu gelegt hat. In dieser Arbeit wird, basierend auf den Schwächen von klassischen Entscheidungsbäumen im Umgang mit wachsender Komplexität ohne Verlust der Generalisierungsgenauigkeit bei ungesehenen Daten, ein Verfahren entwickelt, das die Güte der Vorhersage verbessert. Eine Begrenzung der Komplexität bedeutet i.d.R. eine suboptimale Genauigkeit bei Trainingsdaten. Dabei stellte HO eine Methode zur Konstruktion der einzelnen Entscheidungsbäume vor, welche sich an den Prinzipien der stochastischen Modellierung anlehnt. Das Ziel ist hierbei, die Genauigkeit sowohl bei Trainingsdaten als auch bei ungesehenen Daten zu erhöhen. Das Wesen der Methode besteht darin, mehrere Entscheidungsbäume in zufällig ausgewählten Unterräumen des Merkmalraums zu erstellen. Zu diesen stochastischen Methoden gehören bspw. Bagging und Boosting. BREIMAN²⁰⁴ beschrieb diese Methode im Jahr 2001 und führte den Begriff Random-Forest-Algorithmus ein. Auf die Grundlagen von Bagging- und Boosting-Verfahren wird innerhalb dieses Teilkapitels kurz eingegangen. Auf eine detaillierte Beschreibung von deren Rolle bei der Entwicklung des Random-Forest-Algorithmus wird dagegen verzichtet und auf die entsprechende Literatur verwiesen, da hierdurch kein Mehrwert für die vorliegende Arbeit erwartet wird.

Ein Random-Forest-Algorithmus besteht aus einer bestimmten Anzahl von einzelnen Entscheidungsbäumen, welche von den Werten eines Zufallsvektors abhängen. Diese Zufallsvektoren sind unabhängig voneinander, haben jedoch die gleiche Verteilung auf

²⁰¹ Vgl. Brownlee (2017), *Master Machine Learning Algorithms*, S. 5; Pham et al. (2020), *On Cesáro Averages for Weighted Trees in the Random Forest*; Strobl et al. (2009), *An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests*, S. 34

²⁰² Vgl. Cutler et al. (2012), *Random Forests*, S. 107; Strobl et al. (2009), *An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests*, S. 3; Breiman (2001), *Random Forrest*, S. 1

²⁰³ Ho (1995), *Random decision forests*

²⁰⁴ Breiman (2001), *Random Forrest*

alle Bäume.²⁰⁵ Zu Beginn wird eine einfache Klassifikation eines einzelnen Entscheidungsbaums anhand eines Beispiels dargestellt (siehe Abbildung 2-15). Hierbei besitzt der Zufallsvektor zwei Merkmale, das Merkmal b , welches für die Anzahl der Beine steht, sowie das Merkmal h , welches für die Größe steht. Mittels dieser Merkmale sollen anschließend Lebewesen klassifiziert werden. Dabei wird an jedem Knoten eine Entscheidung getroffen. Im ersten Beispiel wird zwischen der Anzahl der Beine entschieden. Anschließend kann je nach Auswahl nach der Höhe entschieden werden. Damit ist die Klassifikation abgeschlossen. Im zweiten Beispiel wird die Reihenfolge der Merkmale vertauscht, was jedoch das Ergebnis der Klassifikation nicht beeinflusst.

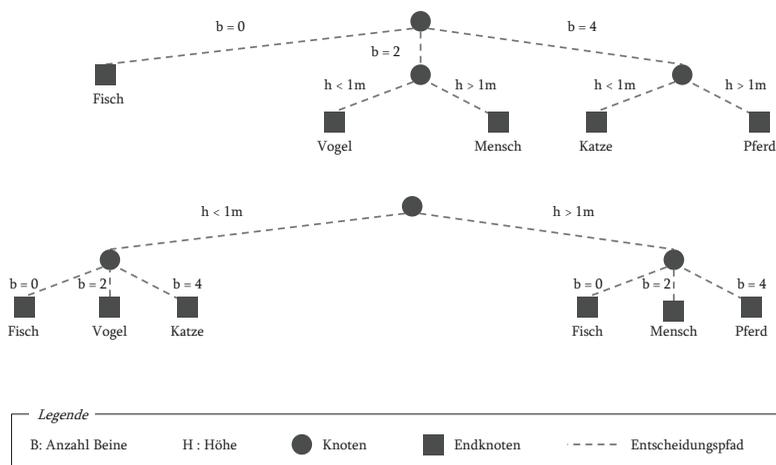


Abbildung 2-15: Zwei funktional gleiche Entscheidungsbäume nach RUNKLER²⁰⁶

Analog zur Klassifikation kann ein Entscheidungsbaum auch zur Regression genutzt werden. Dabei werden im Gegensatz zur Klassifikation keine diskreten Werte als Zielvariablen ausgegeben, sondern fortlaufende Werte.²⁰⁷ Hierbei werden jedoch im Gegensatz zu anderen statistischen Methoden, wie der linearen Regression, keine linearen Zusammenhänge erstellt.²⁰⁸ Der Regressionsbaum nähert allerdings die Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eingangs- und Ausgangsgrößen an, wobei der

²⁰⁵ Vgl. Breiman (2001), Random Forrest, S. 5

²⁰⁶ In Anlehnung an Runkler (2015), Data Mining, S. 103

²⁰⁷ Vgl. Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees, S. 228ff.

²⁰⁸ Vgl. Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees, S. 228ff.

kontinuierliche Raum in verschiedene Regionen unterteilt wird.²⁰⁹ Als einfaches Beispiel für eine Vorhersage soll die Körpergröße basierend auf dem Alter vorhergesagt werden (siehe Abbildung 2-16).

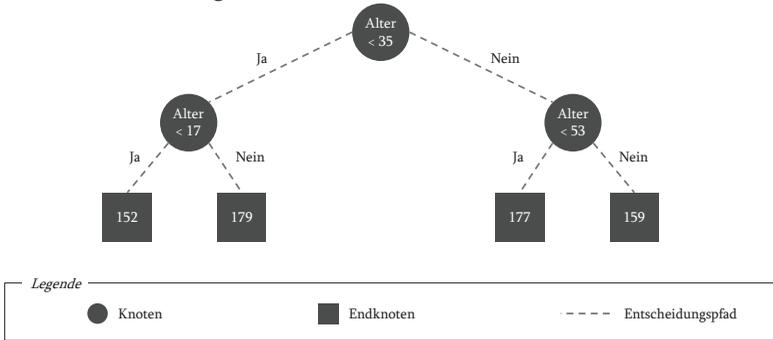


Abbildung 2-16: Beispiel eines Regressionsbaums

Anhand des Beispiels wird deutlich, dass der Regressionsbaum den kontinuierlichen Raum der Zielvariable in unterschiedliche Bereiche unterteilt.²¹⁰ Im hier gezeigten Beispiel wird die Körpergröße nur anhand des Alters unterschieden. Durch das Hinzunehmen von weiteren Kriterien können die Bereiche der Zielvariable weiter unterteilt werden. Insbesondere bei vielen verschiedenen Merkmalen sollte jedoch nicht auf einen einfachen Regressionsbaum, sondern auf eine Vielzahl von Regressionsbäumen zurückgegriffen werden. Die Verwendung mehrerer Entscheidungsbäume wird im Folgenden mittels des Random-Forest-Algorithmus beschrieben.

Zur Verwendung eines Random-Forest als Regressionsalgorithmus werden mehrere Entscheidungsbäume erstellt. Dabei wird an jedem Entscheidungsbäum eine Zielvariable x berechnet. Die berechneten Zielvariablen der einzelnen Entscheidungsbäume werden anschließend gemittelt und stellen so das Gesamtergebnis der Regression dar.²¹¹ Bei der Mittelung der Ergebnisse der Bäume können diese unterschiedlich gewichtet werden und somit in unterschiedlicher Stärke in das Gesamtergebnis einfließen.²¹² Durch die Gewichtung der einzelnen Bäume wird dabei sichergestellt, dass Bäume mit einer höheren Prädiktionsgüte stärker berücksichtigt werden.²¹³

²⁰⁹ Vgl. Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees, S. 228ff.

²¹⁰ Vgl. Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees, S. 229

²¹¹ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 592

²¹² Vgl. Pham et al. (2020), On Cesàro Averages for Weighted Trees in the Random Forest, S. 1ff.

²¹³ Vgl. Cutler et al. (2012), Random Forests, S. 168

Formel 1: Random-Forest Regressor

$$\hat{f}_{rf}^B(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T(X; \Theta_b)$$

mit

$\hat{f}_{rf}^B(x)$	Vorhersage des Random Forest für die Zielvariable x
B	Anzahl der Bäume
T	Einzelner Entscheidungsbaum
X	Vorhersage des einzelnen Entscheidungsbaums
Θ_b	Charakterisierung des b -ten Entscheidungsbaums

Für die einzelnen Entscheidungsbäume wird häufig der CART-Algorithmus verwendet, welcher 1984 von BREIMAN, FRIEDMAN, OLSHEN und STONE entwickelt wurde.²¹⁴ Durch eine rekursive Partitionierung des Merkmalraums entsteht ein Entscheidungsbaum, welcher mit einem Knoten beginnt, in welchem alle Beobachtungen vorhanden sind. Es erfolgt eine Aufteilung des Knotens in zwei disjunkte Mengen. Mit jeder Teilmenge wird wieder genauso verfahren, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht wird. Bei den Knoten wird zwischen den inneren Knoten und den Endknoten unterschieden, wobei Endknoten nicht mehr weiter geteilt werden.²¹⁵ Die Teilung entlang der Knoten erfolgt jeweils auf Basis eines Splitpunkts (metrische Variablen) oder einer Teilmenge (kategoriale Variablen). Zur Vereinfachung wird jedoch im vorliegenden Fall immer von einem Splitpunkt gesprochen. Erfüllt eine Menge an Beobachtungen das Splitkriterium, dann wandern diese in den linken Knoten. Die übrigen Beobachtungen, welche das Splitkriterium nicht erfüllen, wandern dementsprechend in den rechten Knoten.²¹⁶ Ausgehend von der Anzahl unterschiedlicher Splitmöglichkeiten gilt es das beste Splitkriterium auszuwählen. Als bestes Splitkriterium wird dabei das Splitkriterium bezeichnet, welches die höchste Wichtigkeit für die gewünschte Vorhersage hat, wobei die Wichtigkeit als Informationsgewinn bezeichnet wird. Diese

²¹⁴ Vgl. Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees; Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 307ff.

²¹⁵ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 307f.

²¹⁶ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 307ff.

Auswahl kann bspw. über die Veränderung des Gini-Index, der Out-of-bag-Randomisierung oder unter Anwendung eines Greedy-Algorithmus erfolgen.²¹⁷

Neben der Auswahl des Splitkriteriums muss ein Abbruchkriterium für die Splitpunkte definiert werden. Dieser wird durch die minimale Anzahl vorhandener Beobachtungen an einem Splitpunkt definiert. Durch die Wahl eines geeigneten Abbruchkriteriums kann ein Overfitting, also eine zu genaue Anpassung des Modells an die Trainingsdaten bei gleichzeitigem Verlust der Vorhersagegenauigkeit gegenüber unbekanntem Daten vermieden werden.²¹⁸ Im Gegensatz dazu steht bei einem zu klein gewählten Abbruchkriterium das Underfitting, also eine zu geringe Anpassung des Modells an die Zusammenhänge in den Daten.²¹⁹

Neben der Auswahl von Abbruchkriterium und Splitkriterien müssen weitere Eigenschaften des Random-Forest-Algorithmus definiert werden. So hat die Anzahl der einzelnen Entscheidungsbäume, welche zur Vorhersage genutzt werden sollen, einen entscheidenden Einfluss auf die Güte des Prädiktionsmodells.²²⁰ Eine Besonderheit des Random-Forest-Algorithmus ist dabei, dass jeder Entscheidungsbaum nur auf ein Subset der vorhandenen Variablen zugreifen kann. Dies wird als Bagging (Bootstrap Aggregating) bezeichnet.²²¹ Hierdurch entstehen unterschiedliche Entscheidungsbäume mit verschiedenen Vorhersagen, welche anschließend zusammengeführt werden. Dabei wird bei einem Random-Forest, im Vergleich zu klassischen Bagging-Verfahren von Bäumen, die Unabhängigkeit der Bäume untereinander durch eine zufällige Auswahl der Variablen gewährleistet. Für eine detaillierte Beschreibung von Bagging-Verfahren wird auf die Literatur verwiesen.²²²

Eine weitere Besonderheit des Random-Forest-Algorithmus ist die Kombination mit Boosting-Verfahren. Hierbei handelt es sich um einen Ansatz, der generell für eine Vielzahl von statistischen Verfahren genutzt werden kann, hier jedoch lediglich im Kontext von Entscheidungsbäumen beschrieben wird. Das bekannteste Verfahren ist

²¹⁷ Vgl. Hastie et al. (2017), *The elements of statistical learning*, S. 594f.

²¹⁸ Vgl. Brownlee (2017), *Master Machine Learning Algorithms*, S. 22ff.; Hastie et al. (2017), *The elements of statistical learning*, S. 596ff.

²¹⁹ Vgl. Brownlee (2017), *Master Machine Learning Algorithms*, S. 22ff.

²²⁰ Vgl. Hastie et al. (2017), *The elements of statistical learning*, S. 589ff.

²²¹ Vgl. Breiman (1996), *Bagging predictors*

²²² Vgl. Breiman (1996), *Bagging predictors*; Hastie et al. (2017), *The elements of statistical learning*; Strobl et al. (2009), *An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests*

das AdaBoosting (Adaptive Boosting), welches einen Meta-Algorithmus des Maschinellen Lernens darstellt.²²³ Dabei werden die Entscheidungsbäume aufeinander aufbauend erstellt. Jeder Baum nutzt nun die Ergebnisse der vorherigen Bäume und jeder dieser Bäume repräsentiert dabei einen sogenannten schwachen Lerner. Durch die Kombination dieser schwachen Lerner und deren Gewichtung bei der Vorhersage der Ergebnisse entsteht ein starker Lerner, welcher häufig bessere Prädiktionsergebnisse gegenüber herkömmlichen Verfahren liefert. Dabei ist jedoch ein wesentlich höherer Aufwand gegenüber einem regulären Random-Forest (siehe Abbildung 2-17) in Kauf zu nehmen. Für genauere Informationen zu Boosting-Verfahren wird auf die Literatur verwiesen.²²⁴

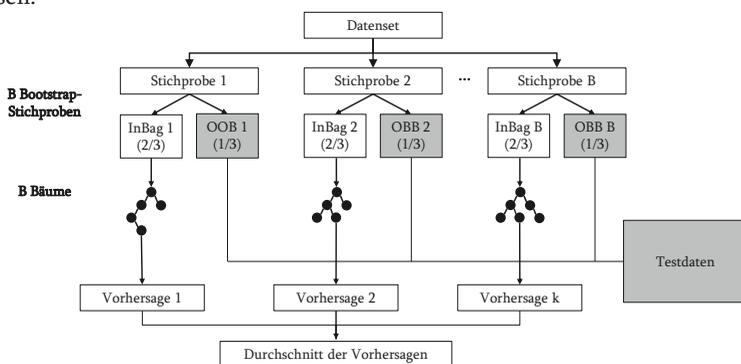


Abbildung 2-17: Random-Forest-Algorithmus

Nachdem die Funktionsweise des Random-Forest-Algorithmus beschrieben wurde, folgt die Messung der Güte des Prädiktionsmodells. Dabei wird lediglich auf die im Kontext der Arbeit relevante Prädiktionsgüte eingegangen. Hier ist insbesondere die Güte gegenüber unbekanntem Daten relevant, da es sich um eine Vorhersage von Aufwänden für noch nicht durchgeführte technische Änderungen handelt. Weiterhin ist die Güte für bekannte Daten i.d.R. besser als für unbekanntem Daten, so dass hier eine Abschätzung zur sicheren Seite bei der Beurteilung der Prognosegüte erfolgt. Die Güte des Prädiktionsmodells für Regressoren des Random Forest wird typischerweise mit dem mittleren quadratischen Fehler (MSE) der Out-of-bag-Prädiktion beur-

²²³ Vgl. Freund et al. (1997), A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting

²²⁴ Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 137ff.; Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 337ff.

teilt. Beim MSE_{Oob} handelt es sich um die Vorhersagegenauigkeit des Modells gegenüber unbekanntem Daten. Der MSE_{Oob} entspricht dabei der gemittelten quadrierten Differenz zwischen dem wahren Wert und dem durch das Modell prädizierten Wert aus den Out-of-bag-Beobachtungen.²²⁵

Formel 2: Mittlerer quadratischer Fehler

$$MSE_{Oob} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{f}_{Oob}(x_i))^2$$

mit

MSE_{Oob}	Mittlerer quadratischer Fehler der Out-of-bag-Prognose
y_i	Tatsächlicher i-te Wert der Zielvariable
$\hat{f}_{Oob}(x_i)$	Prognosewert
N	Anzahl der Beobachtungen

Das Ziel ist es dabei, den MSE_{Oob} zu minimieren. Dafür wird bei jeder Bootstrap-Stichprobe ein Teil der Daten nicht zum Training verwendet. Diese Daten werden zur Bestimmung der Prädiktionsgüte und der Wichtigkeit der Variablen genutzt. Auf das Vorgehen zur Minimierung des MSE_{Oob} wird im Zuge der Entwicklung des Algorithmus in Unterkapitel 5.4 eingegangen, da diese für die Hyperparameteroptimierung der Modellbildung von Bedeutung ist.²²⁶

2.5 Zwischenfazit zu den Grundlagen und Definitionen

Ziel des zweiten Kapitels war es, die Grundlagen zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse zu vermitteln. Dabei wurden insbesondere die in der Hauptforschungsfrage adressierten Punkte vorgestellt. Hierzu wurde zu Beginn der Begriff der technischen Änderung in den Kontext der Produktentwicklung (vgl. Unterkapitel 2.1) und des technischen Änderungsmanagements (vgl. Unterkapitel 2.2) ge-

²²⁵ Vgl. Cutler et al. (2012), Random Forests, S. 164ff.; Strobl et al. (2009), An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests, S. 19; Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees

²²⁶ Vgl. Cutler et al. (2012), Random Forests, S. 164ff.; Strobl et al. (2009), An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests, S. 19; Breiman et al. (1984), CART: Classification and Regression Trees

stellt. Anschließend erfolgte die Einordnung der prädiktiven Datenanalyse, indem Datenanalysen insbesondere im Kontext von KDD-Prozess, CRISP-DM und dem darin enthaltenen Data Mining vorgestellt wurden (vgl. Unterkapitel 2.3). Abschließend wurden das im Zuge der Arbeit verwendete Prognoseverfahren auf Basis des Maschinellen Lernens sowie die Kriterien zur Auswahl des Algorithmus beschrieben. Folglich wurde der ausgewählte Random-Forest-Algorithmus dezidiert dargelegt (vgl. Unterkapitel 2.4).

Durch diese Ausführungen sind alle relevanten Grundlagen zur Entwicklung einer Bewertungsmethodik technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse vorgestellt. Weiterhin wurde das Themengebiet eingegrenzt. Nachfolgend werden im dritten Kapitel der Forschungsbedarf und die Herausforderungen aus der Sicht der Praxis, basierend auf einer Analyse und Vorstellung bestehender wissenschaftlicher Ansätze, dargelegt.

3 Bestehende Ansätze zur Bewertung technischer Änderungen

Im vorherigen Kapitel wurden die Grundlagen der vorliegenden Arbeit beschrieben. Im Rahmen des dritten Kapitels erfolgt die Bewertung der bestehenden Ansätze im Kontext dieser Arbeit. Mit deren Hilfe wird der Forschungsbedarf für die Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse herausgearbeitet. Außerdem werden eingangs die Herausforderungen der Praxis herausgestellt. Hierdurch werden die thematische Relevanz und die Anwendungsorientierung der Arbeit sichergestellt. Im Anschluss an die Darstellung der praktischen Herausforderungen folgt die Darstellung des Theoriedefizits. Zu diesem Zweck werden bestehende Ansätze hinsichtlich eines Objekt- und Zielbereichs untersucht und bewertet. Weiterhin wird die Lösungshypothese der Arbeit berücksichtigt. Abschließend wird ein Zwischenfazit abgeleitet, auf dessen Basis eine Methode zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse entwickelt wird.

3.1 Herausforderungen in der Praxis

Wie bereits in den einleitenden Kapiteln 1 und 2 dargestellt, ist die Bewertung von Aufwand und Nutzen einer technischen Änderung nicht trivial. Sie ist jedoch Bestandteil des Produktentstehungsprozesses, welcher heute durch technologische Fortschritte und die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit immer weiter verkürzt wird.²²⁷ Unternehmen müssen innerhalb kürzester Zeit und mit wenigen Ressourcen Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen anbieten. Technologische Innovationen gehen dabei insbesondere mit veränderten Kundenanforderungen einher. Kunden erwarten heute hochentwickelte, individuelle und dennoch erschwingliche Produkte.²²⁸ Um diesen Erwartungen weiter gerecht zu werden, entwickeln sich viele Produkte zu hochkomplexen Systemen, die neueste Technologien aus den Bereichen Mechanik, Elektronik und Software vereinen.²²⁹ Diese Tendenzen begünstigen das Auftreten

²²⁷ Vgl. Schuh et al. (2016), Concept for development project management by aid of predictive analytics, S. 2040f.

²²⁸ Vgl. Schuh et al. (2018), Produktkomplexität managen, S. 3f.

²²⁹ Vgl. Schuh et al. (2018), Produktkomplexität managen, S. 6f.

technischer Veränderungen, die untrennbarer Bestandteil jedes Entwicklungsprozesses sind.²³⁰

Neben den oben beschriebenen Auszügen wird im Zuge der Darstellung der Herausforderungen in der Praxis auch auf die Erfahrungen und Erkenntnisse aus Industrieprojekten und Arbeitskreisen zurückgegriffen. Diese wurden am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen in verschiedenen Branchen (bspw. Anlagenbau und Komponentenhersteller) durchgeführt und fokussierten unterschiedliche Aspekte aus den Bereichen Entwicklungsprozessgestaltung und Komplexitätsmanagement.

Der Ressourcenaufwand von technischen Änderungen in Entwicklungsprozessen ist erheblich und kann nach LANGER und DEUBZER etwa 20% bis 25% der Entwicklungskapazität ausmachen.²³¹ In weiteren Studien werden ähnliche Werte bezüglich der Aufwände genannt. FRICKE ET AL. beschreiben, dass ca. 30% der täglichen Arbeit eines Ingenieurs im Kontext von technischen Änderungen stattfinden.²³² Dabei können Änderungen in stark unterschiedlicher Form auftreten. Hierdurch fällt es in den meisten Fällen selbst erfahrenen Entwicklern schwer, eine gute Abschätzung der Aufwände von technischen Änderungen abzugeben.²³³ Eine zielgerichtete Abschätzung der Aufwände und des Nutzens von technischen Änderungen ist jedoch zwingend notwendig, damit die Wirtschaftlichkeit von Änderungen bewertet werden kann.²³⁴ Sie stellt heute eine der zentralen Herausforderungen innerhalb des Änderungsprozesses dar.²³⁵ Dabei können wirtschaftliche Änderungen insbesondere mittel- und langfristig sinkende Kosten erzielen, die der kurzfristigen Kostensteigerung durch eine Änderung gegenüberstehen.²³⁶ Für eine Einschätzung von Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen wird dabei eine Vielzahl von Einflussfaktoren als relevant angesehen (siehe Abbildung 3-1). In der vorliegenden Arbeit werden diese und weitere Einflussfaktoren untersucht, wobei aus der Grafik bereits ersichtlich wird, dass insbesondere Kosten, Wirkung und Aufwand der Änderungen als wichtig erachtet werden. Diese bilden häufig die Grundlage für die Entscheidung, ob eine Änderung umgesetzt wird oder nicht.

²³⁰ Vgl. Potdar et al. (2018), Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries, S. 369; Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 3

²³¹ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 4; Deubzer et al. (2005), Der Änderungsmanagement Report 2005, S. 4

²³² Vgl. Fricke et al. (2000), Coping with changes, S. 170

²³³ Vgl. Ahmad et al. (2009), Estimating the Process Cost of Implementing Engineering Change Alternatives, S. 1

²³⁴ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 35

²³⁵ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 35

²³⁶ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 23

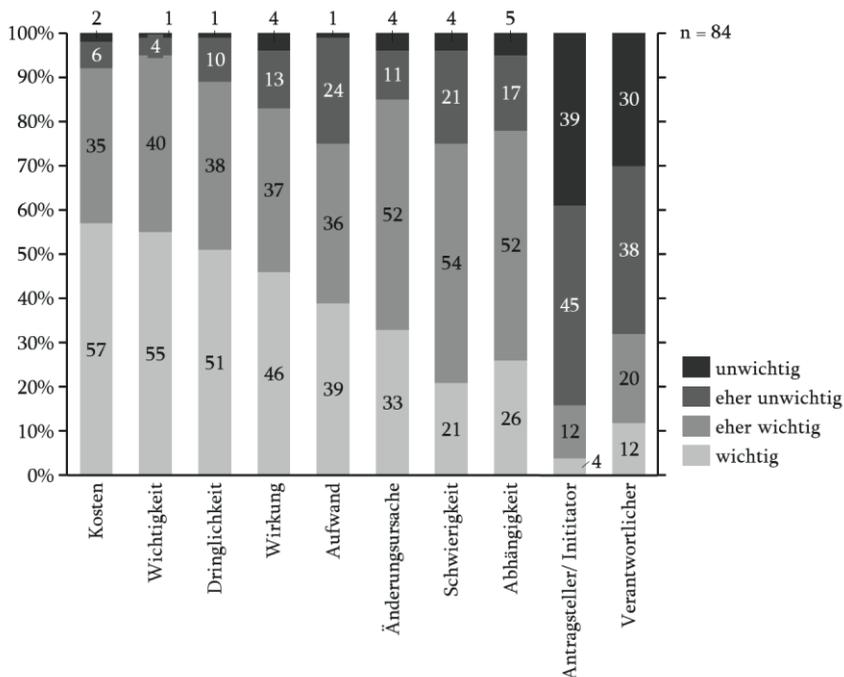


Abbildung 3-1: Eigenschaften zur Bewertung und Kategorisierung von technischen Änderungen²³⁷

Die Vielzahl der Einflussfaktoren erklärt auch die Komplexität der Vorhersage von Aufwand und Nutzen der Änderungen. In der Praxis fehlt es an geeigneten Vorhersagemodellen, um den Aufwand technischer Änderung vorherzusagen. Um dies zu ermöglichen sind technische Änderungen entsprechend zu beschreiben. Damit diese Vorhersagen zielgerichtet durchgeführt werden kann, müssen die Mitarbeiter des Änderungsmanagements weg von einer erfahrungsbasierten Vorhersage, hin zu einer auf Daten basierenden Analyse und Vorhersage.

Die Datenverfügbarkeit und die Möglichkeit, Daten zu nutzen, sind in vielen Unternehmen der produzierenden Industrie zunehmend gegeben.²³⁸ Insbesondere Daten zu

²³⁷ In Anlehnung an Koch et al. (2015), Studie: Änderungsmanagement in der Produktion, S. 37

²³⁸ Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

technischen Änderungen liegen i.d.R. gut dokumentiert in den Unternehmen vor (siehe Abbildung 3-2). Trotzdem ist die Anwendung von Datenanalysen in der F&E bisher noch nicht weit verbreitet, was unter anderem im Rahmen einer Benchmarkingstudie des Werkzeugmaschinenlabors WZL der RWTH Aachen zum Thema Künstliche Intelligenz in der F&E bestätigt wurde. Als größte Herausforderungen bei der Anwendung von prädiktiver Datenanalyse werden dabei die Komplexität der Verfahren sowie mangelndes Wissen und fehlende Ressourcen genannt.²³⁹

Abbildung 3-2: Dokumentation und Bereitstellung von Informationen²⁴⁰

Die fehlende Nutzung der Daten zur proaktiven Bewertung und Vorhersage von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen haben ein hohes Potenzial, den Umgang mit technischen Änderungen in der Praxis zu verbessern. Die systematische Nutzung von Daten und Datenanalysen ist hierbei ein bewährtes Mittel zur Steigerung von Prozesseffizienz und -effektivität.²⁴¹ Auch WICKEL ET AL. beschreiben in ihrer Arbeit, dass die Anwendung von Datenanalysen im Umfeld von technischen Änderungen ein hohes Potenzial zur Reduktion von Zeit und Ressourcen birgt.²⁴² Dieses Potenzial gilt es durch die im Zuge der Arbeit entwickelte Methodik zu verwirklichen, um eine verbesserte Vorhersage der Aufwände technischer Änderungen zu ermöglichen.

Zusammenfassend lassen sich die folgenden Defizite in der Praxis bei der Bewertung von technischen Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse identifizieren:

Steigende Komplexität der Produkte und kürzere Innovationszyklen führen zu einer **Mehrzahl an Änderungen**, welche erstellt, bewertet und implementiert werden müssen.

Es findet eine **starke Ressourcenbindung durch technische Änderungen** innerhalb des Produktentstehungsprozesses statt, so dass diese Ressourcen nicht für die Kernaktivitäten der Produktentwicklung zur Verfügung stehen.

Die **Effektivität und Effizienz im Änderungsmanagement** können durch Datenanalyse gesteigert werden, indem Änderungen zielgerichtet hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit ausgewählt werden.

Daten sind grundlegend in den Unternehmen vorhanden, werden aber nicht umfangreich genutzt, um eine Verbesserung der Vorhersage technischer Änderungsaufwände zu erzielen.

²³⁹ Vgl. Mauerer (2018), Predictive Analytics Studie, S. 22

²⁴⁰ In Anlehnung an Koch et al. (2015), Studie: Änderungsmanagement in der Produktion, S. 36

²⁴¹ Vgl. Fan et al. (2014), Challenges of Big Data Analysis, S. 293ff.

²⁴² Vgl. Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, S. 134f.

Die **Anwendung von prädiktiver Datenanalyse zur Vorhersage von Aufwand und Nutzen** bietet Potenzial zur Verbesserung der Vorhersagegüte im Gegensatz zu erfahrungsbasierten Ansätzen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Anwendung von prädiktiver Datenanalyse das Potenzial hat, die Effektivität und Effizienz im technischen Änderungsmanagement zu steigern. Dies geschieht durch eine zielgerichtete Auswahl wirtschaftlich sinnvoller technischer Änderungen, woraus eine verringerte Ressourcenbindung in der Entwicklung und weniger unwirtschaftliches Nacharbeiten resultieren.

3.2 Darstellung und Bewertung bestehender Ansätze zur datenbasierten Änderungsbewertung

Im Rahmen dieses Unterkapitels erfolgt die Darstellung und Bewertung der bestehenden Theorien und Ansätze zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Diese werden zu Beginn vorgestellt, anschließend erfolgt eine Bewertung im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfüllung bestehender inhaltlicher Herausforderungen, welche die vorliegende Arbeit adressieren will. Hierzu werden in Teilkapitel 3.2.1 Kriterien definiert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Objekt- und Zielbereichs sowie der Lösungshypothese. Diese Kriterien werden anschließend in Teilkapitel 3.2.2 zur Beschreibung und Bewertung der bestehenden Theorien und Ansätze genutzt. Abschließend erfolgt in Teilkapitel 3.2.3 die Positionierung der Arbeit in Abgrenzung zu den vorliegenden Ansätzen. Somit wird der Forschungsbedarf der vorliegenden Arbeit dargelegt.

3.2.1 Kriterien zur Bewertung bestehender Ansätze

Die bestehenden Ansätze werden bezogen auf den **Objektbereich** dahingehend bewertet, ob sie die folgenden Aspekte untersuchen oder berücksichtigen:

Fokus auf produzierende Industrie:

Die Methodik soll sich auf Unternehmen beziehen, welche Hersteller oder Lieferant von Maschinen, Anlagen oder Komponenten sind. Reine Dienstleistungsunternehmen oder Softwareentwicklungen werden nicht betrachtet.

Fokus auf technische Produkte:

Die Methodik fokussiert physische technische Produkte, welche einen Produktentwicklungsprozess durchlaufen und in einer Produktion gefertigt werden.

Fokus auf technische Änderungen:

Die Methodik fokussiert die technischen Änderungen innerhalb eines Unternehmens und den Umgang mit diesen. Das Verständnis von technischen Änderungen ist dabei in Unterkapitel 2.2 dargestellt.

Fokus auf Umsetzungskosten technischer Änderungen:

Die Methodik fokussiert die Umsetzungskosten von technischen Änderungen, die im Zuge der Aktivitäten einer technischen Änderung von der Initiierung bis zur erfolgreichen Umsetzung anfallen.

Fokus auf den Nutzen technischer Änderungen:

Die Methodik soll sich auf den Nutzen von technischen Änderungen beziehen, der durch die Umsetzung einer technischen Änderung erzielt wird.

Bezogen auf den **Zielbereich** werden die bestehenden Ansätze dahingehend bewertet, ob sie die folgenden Aspekte untersuchen oder berücksichtigen:

Beschreibung technischer Änderungen:

Die einheitliche Beschreibung von technischen Änderungen soll auf Basis einer merkmals- und ausprägungsbasierten Beschreibung erfolgen. Hierzu müssen diese im Zuge des Forschungsprozesses ermittelt werden.

Ermittlung von Grundtypen technischer Änderungen:

Die Methodik beschreibt die Ableitung von Grundtypen technischer Änderungen. Diese bilden die Basis zur Vorhersage des Aufwands der technischen Änderungen. Weiterhin sollen sie zur Ermittlung der Möglichkeit einer Änderungsbündelung genutzt werden.

Beschreibung der Systemgrenzen von Aufwand und Nutzen

Zur Ermittlung von Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen müssen die Grenzen des Betrachtungsbereichs festgelegt werden. Hierzu kann ein systemtheoretischer Ansatz verfolgt werden.

Ermittlung der Zusammenhänge zwischen technischen Änderungen sowie Aufwand und Nutzen

Die Methodik soll die Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen technischen Änderungen und deren Aufwand und Nutzen vorhersagen. Hierzu soll ein Verfahren der prädiktiven Datenanalyse genutzt werden.

Ableitung von Umsetzungsempfehlungen zur Minimierung der Gesamtänderungsaufwände

Die Beschreibung der Methodik soll den der Gesamtänderungsaufwand technischer Änderungen durch gezielte Bündelung minimieren. Hierzu werden die Änderungen, deren Grundtypen sowie der Aufwand und Nutzen für die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung beschrieben.

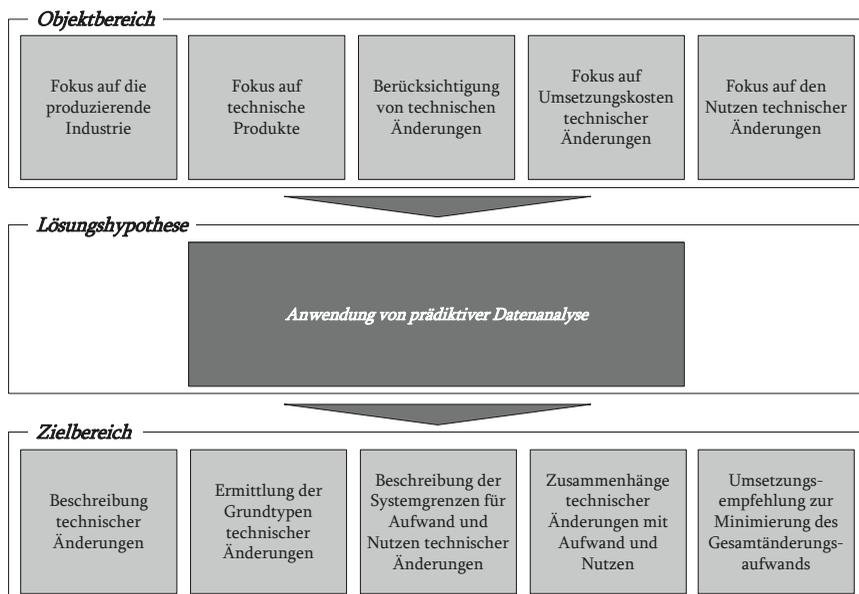


Abbildung 3-3: Objektbereich, Zielbereich und Lösungshypothese der Arbeit

Neben den beschriebenen Kriterien innerhalb des Objekt- und Zielbereichs liegt der vorliegenden Arbeit die folgende **Lösungshypothese** zugrunde:

Durch die Ermittlung von Änderungstypen lassen sich technische Produktänderungen mittels prädiktiver Datenanalyse so bewerten, dass der Gesamtänderungsaufwand minimiert wird.

3.2.2 Darstellung bestehender Ansätze zur datenbasierten Änderungsbewertung

In diesem Teilkapitel folgt die Darstellung bestehender Theorien und Ansätze zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Diese werden anhand des vorgestellten Objekt- und Zielbereichs sowie der Lösungshypothese bewertet. Eine Zusammenfassung der Kriterien erfolgt in Teilkapitel 3.2.3. In diesem Teilkapitel werden die Ansätze in alphabetischer Reihenfolge innerhalb ihrer Teilbereiche beschrieben. Dabei können die Ansätze in die folgenden Teilbereiche aufgeteilt werden: Grundlagen des technischen Änderungsmanagements, Beschreibung von Typen

technischer Änderungen, Change-Propagation-Management, Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, Anwendung von datenbasierten Verfahren im technischen Änderungsmanagement.

Grundlagen des technischen Änderungsmanagements

A Taxonomy for Engineering Change Management in Complex ETO Firms nach ARICA ET. AL.

In der Arbeit von ARICIA ET AL.²⁴³ wird eine Taxonomie für das Engineering Change Management in komplexen Engineer-to-Order Unternehmen vorgeschlagen. Diese Taxonomie umfasst alle Aktivitäten vor, während und nach dem Engineering Change. Hierzu wird eine Literaturstudie von 62 wissenschaftlichen Dokumenten durchgeführt. Die Validierung erfolgt anhand einer Fallstudie bei einem großen Hersteller von komplexen Offshore-Plattformen. Die Studie liefert einen ganzheitlichen Ansatz für ECM, der Organisationen und Einzelpersonen helfen kann, ECs effizient zu verwalten. Die Fallstudie hat die aktuellen ECM-Praktiken des Unternehmens identifiziert und bewertet sowie potenzielle Verbesserungsbereiche und Maßnahmen vorgeschlagen. Weitere Studien sind geplant, um die Taxonomie in anderen realen Fertigungsunternehmen mit ETO-Charakteristika zu testen und zu verifizieren. Die Studie liefert jedoch keine Unterstützung hinsichtlich einer Vorhersage von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen.

Engineering change: an overview and perspective on the literature nach JARRATT ET AL.

Das Ziel der Arbeit von JARRATT ET AL.²⁴⁴ ist es, neuen Forschern aus dem Umfeld von technischen Änderungen ein Verständnis für die Breite und Tiefe des Felds zu vermitteln. Weiterhin sollen Hinweise und Informationen zum aktuellen Stand der Technik vermittelt werden, bevor eine Beschreibung der unterschiedlichen Bereiche von technischen Änderungen stattfindet. Zu Beginn erfolgt eine Übersicht bezüglich der Definitionen von technischen Änderungen, anschließend eine Darstellung der Bedeutung technischer Änderung entlang des Produktlebenszyklus sowie eine Beschreibung des Änderungsprozesses. Es folgt die Erläuterung unterschiedlicher Auslöser von technischen Änderungen sowie verschiedener Möglichkeiten, Änderungen zu klassifizieren. Hierbei werden bspw. Dringlichkeit, Zeitpunkt und Effekte von technischen Änderungen genannt. Abschließend werden Tools zur Unterstützung technischer Änderungen sowie des Änderungsprozesses erwähnt. Die Arbeit entwickelt dabei keine eigene

²⁴³ Arica et al. (2016), A Taxonomy for Engineering Change Management in Complex ETO Firms

²⁴⁴ Jarratt et al. (2011), Engineering change

Lösung hinsichtlich der Bewertung des Aufwands technischer Änderungen, bietet jedoch eine umfangreiche Basis für Untersuchungen von technischen Änderungen und ist eines der meistzitierten Werke in diesem Kontext.

Änderungsmanagement nach LANGER

Der Beitrag von LANGER²⁴⁵ beschreibt die Grundlagen des technischen Änderungsmanagements. Hierzu erfolgt zunächst eine Definition der Begrifflichkeiten, Grundlagen zur Entstehung von technischen Änderungen und eine Beschreibung der Auswirkungen technischer Änderungen. Weiterhin wird auf Einfluss- und Gestaltungsfaktoren, den Änderungsprozess im Kontext der Produktentwicklung, Strategien und Tools zur Unterstützung des Änderungsprozesses eingegangen. Dieser wird dabei grundlegend in die Phasen des Änderungsvorlaufs sowie der Änderungsdurchführung unterschieden. Als Gestaltungsfelder für das Änderungsmanagement werden Personen, Produkte, Ablauf- und Aufbauorganisation, Unternehmensstrategie und -führung sowie das Unternehmensumfeld genannt. Als eine Möglichkeit, den Änderungsprozess zu verbessern, nennt LANGER die Unterstützung eines effektiven und schnellen Entscheidungsprozesses über die Umsetzung von Änderungen, mit dem Ziel, ein besseres Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei der Umsetzung technischer Änderungen zu erreichen. Hierzu sind insbesondere neue Methoden zur Abschätzung der Zielgrößen relevant, was auch das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit darstellt.

Integriertes Änderungsmanagement nach LINDEMANN ET AL.

Das Ziel der Arbeit von LINDEMANN ET AL.²⁴⁶ ist es, Erfolgspotenziale des technischen Änderungsmanagements durch eine integrierte Betrachtung von betriebswissenschaftlichen und organisatorischen Aspekten zu identifizieren. Hierzu wird zu Beginn das Modell des integrierten Änderungsmanagements vorgestellt. Es folgen Bausteine zur Optimierung des technischen Änderungsmanagements sowie Aktionsfelder für das integrierte Änderungsmanagement. Relevante Aktionsfelder sind bspw. die Änderungserkennung, Problem- und Ursachenbeschreibung sowie die Auswirkungserfassung und Änderungsplanung. Weiterhin werden die gesamtheitliche wirtschaftliche Bewertung und Entscheidung genannt. Innerhalb dieses Aktionsfelds kann auch die hier vorliegende Arbeit eingeordnet werden. LINDEMANN ET AL. beschreiben hier unter anderem die Kosten und Erlöse durch technische Änderungen und liefern eine Strukturierung für Änderungskosten. Als Kernanliegen kann die ganzheitliche Betrachtung der Kosten betrachtet werden. Insgesamt werden hier umfangreiche Grundlagen im

²⁴⁵ Langer (2016), Änderungsmanagement

²⁴⁶ Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement

Bereich des Änderungsmanagements aufgezeigt und anhand von Fallbeispielen validiert, so dass auf zahlreiche der hier geschaffenen Grundlagen im Zuge der vorliegenden Arbeit zurückgegriffen werden kann.

Innovationsmanagement nach SCHUH

Die Arbeit von SCHUH²⁴⁷ befasst sich unter anderem mit dem Thema der technischen Änderungen. Hierbei zeigt SCHUH acht Problem- und Aktionsfelder des technischen Änderungsmanagements auf. Von besonderer Bedeutung im Kontext dieser Arbeit ist das Problemfeld der fehlenden Kosten-/Nutzenanalyse. Aus diesem wiederum kann das Aktionsfeld einer notwendigen wirtschaftlichen Bewertung und Entscheidung für technische Änderungen abgeleitet werden. Dabei wird der Änderungsprozess in die vier Phasen Änderungserkennung, Änderungsbewertung, Änderungsplanung und Änderungsumsetzung unterteilt. In der Phase der Änderungsbewertung wird dabei eine möglichst vollständige Liste von Kriterien zur Beurteilung von Wichtigkeit und Dringlichkeit technischer Änderungen gefordert. Weiterhin wird das Problem der hohen Kostenabweichung in der Praxis erwähnt. Insbesondere indirekte Änderungskosten sollten daher mitberücksichtigt werden und bspw. mithilfe von prozesskostenorientierter Rechnung verteilt werden. Außerdem wird das Thema Release-Management als Möglichkeit zur Bündelung von technischen Änderungen vorgestellt. Insgesamt bildet die Arbeit eine gute Grundlage für das allgemeine Verständnis und zeigt die Notwendigkeit einer wirtschaftlichen Bewertung von technischen Änderungen, welche im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelt wird.

A Literature Review on Approaches for the Retrospective Utilization of Data in Engineering Change Management nach TALE-YAZDI

Das Ziel der Arbeit nach TALE-YAZDI²⁴⁸ ist es, eine Übersicht aktueller datenbasierter Methoden bezüglich einer A-posteriori-Analyse von technischen Änderungen zu erstellen. Hierzu werden ausgewählte Methoden vorgestellt und gegenüber zuvor definierten Kriterien bewertet. Als Basis wird eine Literaturanalyse bezüglich Engineering-Change-Management, Knowledge Discovery in Databases und Data Mining durchgeführt. Anschließend werden auf Basis eines grundlegenden Domäne-Verständnisses Anwendungspotenziale der Methoden identifiziert, verglichen und bewertet. A-posteriori-Analysen dienen dabei grundsätzlich dazu, Erkenntnisse aus vergangenen Änderungen zu erzielen und diese in der Zukunft zu nutzen. Als grundlegende

²⁴⁷ Schuh (2012), Innovationsmanagement

²⁴⁸ Tale-Yazdi et al. (2018), A Literature Review on Approaches for the Retrospective Utilisation of Data in Engineering Change Management

Erkenntnis der Arbeit wird festgestellt, dass die existierenden Ansätze nicht den Anforderungen des Engineering-Change-Managements genügen. Hieraus wird der Bedarf an weiterer Forschungsarbeit abgeleitet. Dabei wird insbesondere die große Menge an Daten im Bereich der technischen Änderungen erwähnt. Diese sollen auch in der hier vorliegenden Arbeit genutzt werden, damit eine Vorhersage von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen ermöglicht wird.

Beschreibung von Typen technischer Änderungen

Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung nach AßMANN

Das Ziel der Arbeit von AßMANN²⁴⁹ ist die Optimierung von Änderungsprozessen zur positiven Beeinflussung des gesamten Entwicklungsprozesses. Dafür wird aufbauend auf dem integrierten Änderungsmanagement ein Änderungsprozess abgeleitet. Es werden Methoden entwickelt, um den Änderungsprozess zu verbessern. Weiterhin werden computergestützte Werkzeuge entwickelt, die die entwickelten Methoden unterstützen. Im Teilschritt der Methodenentwicklung für den Änderungsprozess entwickelt AßMANN auch eine Änderungsklassifikation als Basis für die anschließende Detaillierung der Prozessschritte. Er verfolgt das Ziel, durch die Klassifizierung die Problemlkomplexität zu reduzieren und eine strukturierte Problemerkfassung, -bewertung und -lösung zu unterstützen. Die Klassifikation stellt ein Hilfsmittel dar, um technische Änderungsanfragen zu analysieren, zu bewerten und zu dokumentieren, und bietet gleichzeitig eine Erleichterung des Entscheidungsprozesses. Für die unterschiedlichen Änderungstypen definiert AßMANN im weiteren Verlauf dieses Teilmodells seiner Arbeit Bearbeitungsmethoden. Bei jedem Änderungstyp wird nochmals zwischen Kann- und Muss-Änderungen unterschieden. Für jede Klasse von technischen Änderungen wird eine Handlungsempfehlung zu deren Bearbeitung vorgestellt. Die Arbeit von AßMANN überschneidet sich dabei in Teilen mit der vorliegenden Arbeit. Insbesondere die Beschreibung und Typisierung technischer Änderungen sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen sind dabei hervorzuheben. Es findet jedoch keine Beschreibung von Aufwand und Nutzen statt. Weiterhin wird kein datenbasiertes Verfahren angewendet.

Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse nach BELENER

BELENER²⁵⁰ beschäftigt sich in seiner Arbeit mit dem Änderungsmanagement von modular aufgebauten Produkten und Prozessen. Dazu entwickelt er zunächst eine Methodik zur Gestaltung änderungsfreundlicher Modulstrukturen, was in den Teilbereich

²⁴⁹ Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung

²⁵⁰ Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse

der Prävention innerhalb des Änderungsmanagements fällt. Anschließend wird eine Klassifikationslogik für technische Änderungen erstellt, um die Strategie des Änderungsmanagements an die Art der technischen Änderung anpassen zu können. Sodann folgt eine Methodik zur Release-Planung. Zum Abschluss werden Aufbau- und Ablaufstrukturen zur Umsetzung der erarbeiteten Methoden im Unternehmen entwickelt. Die Beschreibung technischer Änderungen erfolgt dabei in Abhängigkeit davon, welches Modul die Änderung betrifft, welche Teiländerungen die Änderung mit sich bringt und welche Ursachen vorliegen. Außerdem erfolgt eine Abschätzung der benötigten Ressourcen (Kosten und Zeit). Nach der Bestandsaufnahme werden die technischen Änderungen gemäß dem Eisenhower-Prinzip nach Wichtigkeit und Dringlichkeit klassifiziert. Über die Menge der Modulabhängigkeiten und der prognostizierten Änderungskosten wird zusätzlich eine Bewertung der Komplexität durchgeführt. Die Bewertungsergebnisse werden in einem Portfolio zusammengefasst (siehe Abbildung 3-4).

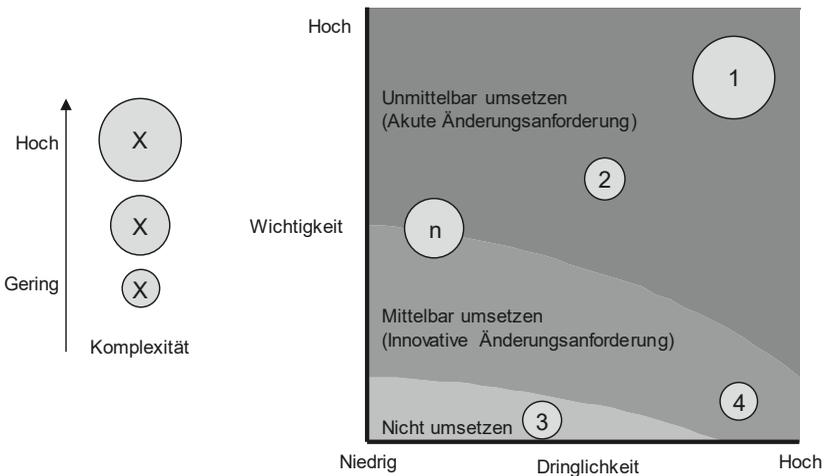


Abbildung 3-4: Visualisierung der Änderungsklassifizierung nach BELENER²⁵¹

²⁵¹ In Anlehnung an Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse

Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen nach EVERSHEIM ET AL.

Die Arbeit von EVERSHEIM ET AL.²⁵² beschäftigt sich damit, wie in Unternehmenskooperationen ein erfolgreiches Änderungsmanagement aussehen könnte. Die Hauptstoßrichtungen sind dabei die Reduktion von Änderungen in späten Produkt- bzw. Entwicklungsphasen und die Optimierung der unternehmensübergreifenden Prozesse zur Ausführung von Änderungen. Das Vorgehen umfasst drei zentrale Schritte: Es beginnt mit der Identifikation von häufig auftretenden Änderungstypen. Dafür wird ein morphologischer Kasten aufgebaut, der eine Typologie der Änderungen ermöglicht. Im zweiten Schritt werden die Prozesse der einzelnen Partnerunternehmen aufgenommen, die bei der Bearbeitung der unterschiedlichen Änderungstypen anfallen. Im letzten Schritt folgt die optimierte Gestaltung von typenspezifischen und unternehmensübergreifenden sowie unternehmensspezifischen Standardabläufen. Die Änderungstypologie liefert dabei Beschreibungsdimensionen von technischen Änderungen. In der Arbeit von EVERSHEIM ET AL. werden keine realen Daten betrachtet. Die Änderungstypologie sowie die Beschreibungsdimensionen bieten jedoch eine gute Grundlage zur Beschreibung von technischen Änderungen sowie Änderungstypen im Kontext prädiiktiver Datenanalyse, wie sie in der vorliegenden Arbeit erfolgt.

Derivation of description features for engineering change request by aid of Latent Dirichlet Allocation nach RIESENER ET AL.

Das Ziel der Arbeit von RIESENER ET AL.²⁵³ ist die Ableitung von Beschreibungsmerkmalen von technischen Änderungen. Hierzu wird Latent Dirichlet Allocation genutzt, ein Wahrscheinlichkeitsmodell für Dokumente, welches zur Ableitung von Themen innerhalb von Dokumenten dient. Zu Beginn wird eine systematische Literaturanalyse durchgeführt. Anschließend erfolgt das Topic Modeling. Darauf folgend werden relevante Merkmale technischer Änderungen abgeleitet. Auf Basis der Merkmale wird abschließend ein Beschreibungsmodell für technische Änderungen entwickelt. Die anschließende Zuordnung von technischen Änderungsanfragen zum Beschreibungsmodell kann dabei sowohl manuell als auch automatisiert mittels Natural Language Processing erfolgen, spielt jedoch für die vorliegende Arbeit keine Rolle. Die Merkmale zur Beschreibung von technischen Änderungen bilden eine gute Grundlage zur Vorhersage von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, wie sie in der hier vorliegenden Arbeit angedacht ist. Dies ist jedoch nicht Thema der Arbeit von RIESENER ET AL.

²⁵² Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen

²⁵³ Riesener et al. (2020), Derivation of description features for engineering change request by aid of latent dirichlet allocation

Change-Propagation-Management

Systematische Bewertung von Auswirkungsanalysen des Engineering Change Managements nach GRÄßLER

GRÄßLER²⁵⁴ beschreibt in ihrer Arbeit Differenzierungskriterien sowie allgemein gültige Anforderungen für die Bewertung von Auswirkungsanalysen technischer Änderungen. Hierzu wird eine systematische Literaturrecherche zu Ansätzen für die Analyse der Auswirkungen von technischen Änderungen, die Kategorisierung und Priorisierung von Ansätzen auf Basis wiederkehrender Elemente, die Ableitung von kontextspezifischen Anforderungen für die Bewertung und die Bewertung der Ansätze durchgeführt. Dabei werden als allgemeine Defizite generell die fehlende Kostenbetrachtung sowie der Aufwand der vorhandenen Methoden kritisiert. Außerdem wird die Wichtigkeit der Automatisierung sowie der Nutzung vorhandener Informationen hervorgehoben. Diese Punkte werden in der vorliegenden Arbeit aufgegriffen und adressiert.

Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme nach HAMRAZ

HAMRAZ²⁵⁵ zielt mit seiner Arbeit auf die allgemeine Verbesserung der Qualität des Änderungsmanagements ab. Die zugrunde liegende Hypothese ist, dass die Vorhersagequalität im Änderungsmanagement durch detailliertere Modellierung der Zusammenhänge zwischen Komponenten verbessert werden kann. Hierzu werden die Ursachen von technischen Änderungen sehr detailliert untersucht. Anschließend werden die technischen Änderungen charakterisiert. Die weiteren Teilmodelle der Arbeit beschäftigen sich mit Methoden, Anforderungen, Konzepten und Elementen des Änderungsmanagements. Mithilfe der „Change Prediction Method“ (CPM) und der „function-behaviour-structure“ (FBS) werden Änderungsfortpflanzungen vorhergesagt. Hierbei wird das Produkt als Netzwerk seiner funktionalen, verhaltensbezogenen und strukturellen Attribute dargestellt. Die Ausbreitung einer Änderung wird anschließend entlang dieser Verknüpfung bewertet. Die Ergebnisse der Arbeit erweitern und verbessern somit den bekannten CPM-Ansatz zur Vorhersage von Änderungsfortpflanzungen. Der Fokus liegt hierbei jedoch auf dem Änderungsmanagement. In der Arbeit werden keine Aufwände oder Nutzen von technischen Änderungen berücksichtigt. Weiterhin werden keine Methoden aus dem Bereich der prädiktiven Datenanalyse angewendet.

²⁵⁴ Iris Gräßler (2021), Systematische Bewertung von Auswirkungsanalysen des Engineering Change Managements

²⁵⁵ Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme

Technische Produktänderungen: Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes nach KÖHLER

Das Ziel der Arbeit nach KÖHLER²⁵⁶ ist es, den Entscheidungsprozess im Änderungsmanagement sicherer und schneller zu gestalten, indem der Produktentwickler dahingehend unterstützt wird, dass die Änderungsfolgen möglichst vollständig bestimmt werden. Dies geschieht durch eine Analyse und Beurteilung unterschiedlicher Lösungsmöglichkeiten einer technischen Änderung. Hierzu wird in der Arbeit eine Erweiterung des Characteristics-Properties-Modelling/Property-Driven-Development (CPM/PDD)-Ansatzes vorgenommen. Mithilfe der Methodik lassen sich Produkt- und Prozessänderungen sowie die Propagation von Änderungen innerhalb eines Produkts beschreiben. Weiterhin wird die Betrachtung bezüglich der Auswirkungen von einer Produktänderung auf andere Produkte und die Herstellbarkeit erweitert. Die wirtschaftlichen Auswirkungen einer technischen Änderung werden vor Erstellung des Modells kurz beschrieben, dann aber bewusst außer Acht gelassen. Zur Ermittlung der kostenseitigen Folgen wird auf bestehende Ansätze verwiesen.

A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration nach YEASIN ET AL.

Das Ziel der Arbeit von YEASIN ET AL.²⁵⁷ ist es, Dynamic Bayesian Networks für die Vorhersage von Change Propagation Risk (CPR) zu nutzen. Hierzu wird der Änderungsausbreitungspfad anhand einer Split-AND-Aufgabenergebnislogik beschrieben. Die Arbeit vergleicht die Ergebnisse der vorgeschlagenen Methode mit den bestehenden Methoden zur Schätzung des CPR und der technischen Änderungsdauer unter Verwendung eines realen Datensatzes aus einem Schiffbauprogramm der U.S. Navy. Die Methode beinhaltet dabei drei Schritte: Zuerst werden eine Änderungswahrscheinlichkeitsmatrix und eine Einflussmatrix erstellt. Anschließend erfolgt die Berechnung des CPR. Zum Abschluss wird der Einfluss auf die technische Änderungsanfrage bestimmt, damit eine Vorhersage der Bearbeitungsdauer getroffen werden kann. Als Resultat wird ein Vorhersagefehler von 12% angegeben, was gegenüber den traditionellen Methoden stark verbessert ist. Insgesamt ist die Vorhersage um 52% besser als bei den existierenden Modellen. Allerdings werden keine genauen Angaben zu Aufwand und Nutzen der technischen Änderungen gemacht.

²⁵⁶ Köhler (2010), Technische Produktänderungen

²⁵⁷ Yeasin et al. (2020), A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration

Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen

Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produkt-Architekturen durch Release-Management nach ALEKSIC

Die Zielsetzung der Arbeit von ALEKSIC²⁵⁸ ist es, technische Änderungen in modularen Produktarchitekturen und deren Prozesssystemen so zu gestalten, dass der Zielkonflikt zwischen technischen Änderungen und Skaleneffekten aufgelöst werden kann. Dabei wird insbesondere die Identifikation eines geeigneten Änderungsumfangs sowie des Änderungszeitpunkts angestrebt. Hierzu wurde eine Methode entwickelt, welche die Anpassungsflexibilität von Modulen beschreibt. Außerdem wurde eine Methode zur Erfassung des optimalen Umfangs von technischen Änderungen im Hinblick auf die Release-Zyklen vorgestellt. Ausgehend von diesem sowie einer entsprechenden Bewertung des Nutzens einer Änderung wurden anschließend Synchronisationsstrategien zwischen dem Produktprogramm und der technischen Änderung definiert. Die Bewertung von Aufwand und Nutzen wird somit in der Arbeit von ALEKSIC adressiert, jedoch wird keine Methode zu deren Durchführung vorgestellt. Aufwand und Nutzen werden jedoch anschließend genutzt, um die Bündelung technischer Änderung zu ermöglichen. Diese Bündelung wird als pareto-optimal beschrieben, wobei der maximale Nutzen der Bündelung als Ziel vorgestellt wird.

Änderungskosten in der Produktentwicklung nach CONRAT NIEMERG

Die Zielsetzung der Ausarbeitung von CONRAT NIEMERG²⁵⁹ liegt in der Identifikation vermeidbarer Änderungskosten durch Integrationsmaßnahmen. Hierzu erfolgt eine Zusammenstellung und Systematisierung von kostenrelevanten Auswirkungen technischer Änderungen auf Basis von Expertenbefragungen und Dokumentenanalysen des Änderungswesens. Weiterhin erfolgt die Entwicklung eines Einflussgrößenmodells für die Entstehung von Änderungskosten. Diese Änderungskosten werden anschließend in verschiedene Klassen eingeordnet. Es wird eine prozessorientierte Methodik zur Systematisierung von Änderungskosten vorgestellt (siehe Abbildung 3-5). Hierbei erfolgt eine Klassifizierung in Prozess- und Folgekosten. Als wesentliche Kostentreiber werden die Änderungsursache, der Änderungszeitpunkt, die Änderungsqualität und die Effizienz der Änderungsabwicklung identifiziert.

²⁵⁸ Aleksic (2015), Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management

²⁵⁹ Conrat Niemerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung

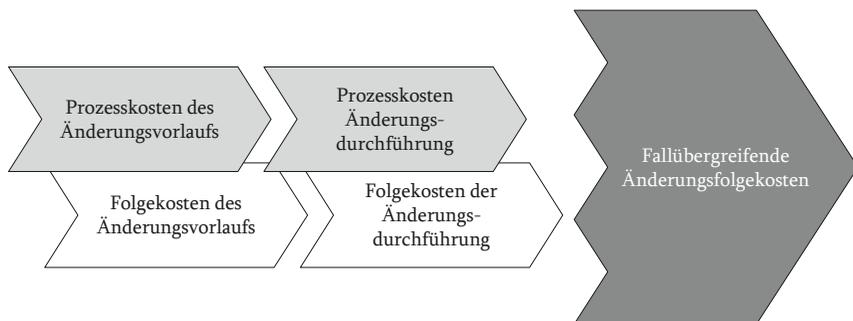


Abbildung 3-5: Prozessorientierte Systematisierung von Änderungskosten in Anlehnung an CONRAT NIEMERG²⁶⁰

Der Ansatz fokussiert die schwer zu erfassenden indirekten Änderungskosten. Ebenso werden wichtige beobachtbare Defizite des Änderungswesens herausgearbeitet. Eine Prognose von Änderungskosten findet jedoch in der Arbeit nicht statt. Der Ansatz liefert dennoch wichtige Grundlagen für die vorliegende Forschungsarbeit und kann als Basis für die Verwendung von datenbasierten Prognoseverfahren genutzt werden.

Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen nach GEBHARDT

Das Ziel der Arbeit von GEBHARDT²⁶¹ ist die Entwicklung eines kausalanalytischen Prognoseansatzes für indirekte Änderungskosten. Unter Verwendung der Kontingenztheorie wurde ein theoretisches Modell zur Ableitung der Höhe der Änderungskosten entwickelt. Hierzu werden Ursache-Wirkungs-Beziehungen in Form von statistischen Hypothesen aufgestellt. Diese werden unter Zuhilfenahme einer Strukturgleichungsmodellanalyse empirisch überprüft und in ein Prognosemodell überführt. Anschließend erfolgt eine Prüfung der Güte des Prognosemodells durch einen Vergleich mit alternativen Modellen. Hierbei konnte keine allgemeine Überlegenheit dargestellt werden. Die empirische Überprüfung erfolgt im Bereich der Antriebstechnik, welche den Objektbereich der Arbeit darstellt. Weiterhin liegt der Fokus auf kundeninduzierten Änderungen. Eine Generalisierbarkeit auf andere Typen von technischen Änderungen ist nicht untersucht worden. Der Ansatz folgt dem Grundsatz der Strukturidentität von Erklärung und Prognose und nutzt keine datengetriebenen und modellselektionsbasierten Entwicklungen von Prognoseansätzen. Hierdurch ist die Abgrenzung zum vorliegenden Forschungsvorhaben sichergestellt. Die Arbeit stellt jedoch eine

²⁶⁰ In Anlehnung an Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 147.

²⁶¹ Gebhardt (2018), Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen

wertvolle Vorleistung für das vorliegende Forschungsvorhaben dar. Anstatt der kausalanalytischen Vorgehensweise, bei der neben der Prognose eine Erklärung der Variablen und Zusammenhänge nötig ist, soll im vorliegenden Vorhaben eine auf prädiktiven Datenanalysen basierende Methodik hergeleitet werden. Die Vorteile bestehen darin, dass der Implementierungsaufwand des Modells in der Praxis geringer ist, da nicht sämtliche kausalen Zusammenhänge der Kostenvariablen bekannt sein müssen, und darin, dass das Modell sich dank des Ansatzes des Maschinellen Lernens selbstständig aktualisiert und an veränderte Gegebenheiten anpassen kann.

Change propagation management by active batching nach OH ET AL.

Das Ziel der Arbeit von OH ET AL.²⁶² ist es, mithilfe des aktiven Zusammenfassens von Änderungsanträgen und zukünftig zu erwartenden Änderungsanträgen die Dauer und Kosten der gesamten Änderungsanträge zu reduzieren. Im Gegensatz zu einem passiven Zusammenfassen von Änderungsanträgen, bei welchem mithilfe von Releases nach einer gewissen Zeit oder einer gewissen Anzahl an Änderungen gearbeitet wird, soll somit eine Minimierung der Änderungskosten und -dauer erfolgen. Anhand eines Referenzprojekts aus der Softwareentwicklung wird aufgezeigt, dass Änderungskosten gespart werden können. Die Änderungszeit verlängert sich dabei jedoch im Vergleich zu einer direkten Bearbeitung der Änderungsanfragen. Weiterhin müssen für die Kostenreduktion gewisse Annahmen erfüllt sein. Die Vorhersage der Änderungfortpflanzung, welche zur Identifikation von Kandidaten zum Zusammenfassen einer Änderung gewählt werden, erfolgt dabei auf Basis der Wahrscheinlichkeit und des Einflusses von Änderungen mittels Design-Structure-Matrix. Insgesamt zeigt die Arbeit die Potenziale zur Kostenminimierung durch aktives Zusammenfassen von Änderungen auf.

Assessment of changes in engineering design using change propagation cost analysis nach REBENTISCH ET AL.

Das Ziel der Arbeit von REBENTISCH ET AL.²⁶³ ist die Entwicklung einer Methodik zur Kostenprognose unterschiedlicher Durchführungsalternativen technischer Änderungen. Dabei soll anschließend die kostengünstigste Alternative ausgewählt werden können. Die Fortpflanzung von Änderungen spielt bei der Kostenbetrachtung eine entscheidende Rolle. In der Arbeit werden technische Änderungen zuerst in einem Beschreibungsmodell durch Konstruktionsparameter, funktionelle Anforderungen aus Kundensicht sowie Prozessvariablen charakterisiert. Im Anschluss werden diese durch

²⁶² Oh et al. (2017), Change propagation management by active batching

²⁶³ Rebentisch et al. (2017), Assessment of changes in engineering design using change propagation cost analysis

Domain-Mapping-Matrizen miteinander verknüpft. Darauf aufbauend werden Änderungsfortpflanzungen prognostiziert. Des Weiteren werden Kostenmatrizen für Änderungen an Prozess- und Konstruktionsparametern gebildet. Durch Verrechnung der Matrizen ergibt sich eine Kostenprognose für eine technische Änderung. Als Schwachstelle des Ansatzes ist das zur Kalibrierung des eingangs erwähnten Beschreibungsmodells notwendige tiefgreifende Expertenwissen anzusehen. Weiterhin ist der Aufbau von Domain-Mapping-Matrizen i.d.R. mit einem hohen Aufwand verbunden. Abschließend kann erwähnt werden, dass die Bewertung der Kosten unter der Voraussetzung stattfindet, dass ein Zusammenhang zwischen der Komplexität des Vorhabens und den Kosten besteht.

Opportunity discovery in initiated and emergent change requests nach SJÖGREN ET AL.

Das Ziel der Arbeit von SJÖGREN ET AL.²⁶⁴ ist es, anstelle der negativen Effekte technischer Änderungen den Fokus auf den positiven Nutzen zu legen. Hierzu wird eine Studie im B2B-Kontext bei Herstellern von technischen Produkten mit einer Vielzahl an Zulieferern durchgeführt. Insgesamt wurden in der Studie 30 Interviews geführt und 207 technische Änderungsanfragen untersucht. Von den untersuchten Änderungsanfragen waren jedoch nur 87 so vollständig, dass sie für die durchgeführte Analyse nutzbar waren. Als Ergebnis wird zuerst die technische Änderungsanfrage beschrieben. Anschließend werden die Änderungsdaten erläutert und abschließend wird auf das Vorgehen zur Identifikation von Nutzenpotenzialen eingegangen. Dabei werden diese Potenziale auch als „miniature design loop“ bezeichnet, da durch die technische Änderung die Möglichkeit vorhanden ist, das initiale Design weiter zu verbessern. Abschließend wird festgestellt, dass der Fokus bei Änderungen i.d.R. auf den negativen Effekten liegt und Nutzenpotenziale von technischen Änderungen nicht systematisch erkannt werden.

Datenbasierte Verfahren im technischen Änderungsmanagement

A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting nach CHAKRABORTY ET AL.

Das Ziel dieser Arbeit nach CHAKRABORTY ET AL.²⁶⁵ ist es, ein neuartiges Modell zur Vorhersage von Baukosten mit Hilfe von hybriden natürlichen und leichten Gradientenverstärkungsmethoden zu entwickeln und zu vergleichen. Die Autoren stellen fest, dass die traditionellen Methoden der Baukostenprognose unzuverlässig, zeitaufwändig

²⁶⁴ Sjögren et al. (2019), Opportunity discovery in initiated and emergent change requests

²⁶⁵ Chakraborty et al. (2020), A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting

und linear sind. Sie schlagen vor, maschinelles Lernen (ML) anzuwenden, um versteckte Muster aus den hochdimensionalen Daten der Baubranche zu extrahieren und genaue und schnelle Kostenschätzungen zu liefern. Dazu Vergleichen sie die Vorhersageleistung von sechs verschiedenen ML-Algorithmen - linearer Regression, künstlichem neuronalem Netzwerk, Random Forest, extremem Gradientenverstärkung, leichtem Gradientenverstärkung und natürlichem Gradientenverstärkung - und zeigen, dass ein hybrides Modell aus leichtem Gradientenverstärkung und natürlichem Gradientenverstärkung die wünschenswertesten Kostenschätzungen in Bezug auf Genauigkeit, Unsicherheitsschätzung und Trainingsgeschwindigkeit liefert. Im Gegensatz zu der hier vorliegenden Arbeit ist der Bezugsrahmen jedoch der Baubranche zuzuordnen und nicht der produzierenden Industrie.

Projektsteuerung in der Produktentwicklung mittels Predictive Analytics nach DÖLLE

Das Ziel der Arbeit von DÖLLE²⁶⁶ ist die Antizipation von Projektabweichungen durch die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen. Hierdurch soll eine Steigerung der Zielerreichung von Entwicklungsprojekten erzielt werden. Als Grundlage wird die Antizipation von Abweichungen auf Aktivitätenebene in zukünftigen Projektabschnitten bewertet. Zu Beginn werden relevante Daten identifiziert. Diese werden für das Training des künstlichen neuronalen Netzes genutzt. Abschließend erfolgt eine Bewertung der antizipierten Abweichungen und die Ableitung geeigneter Steuerungsmaßnahmen zur Vermeidung von Zielabweichungen. Den Betrachtungsgegenstand stellen hierbei laufende Projekte dar, welche hinsichtlich ihrer Zeit-, Kosten- und Qualitätsziele bewertet werden. Die Vorhersage von Abweichungen ist dabei insbesondere im Kontext von technischen Änderungen interessant. Die Arbeit von DÖLLE zielt nicht explizit auf technische Änderungen ab, beschreibt jedoch die Möglichkeiten zur Anwendung von prädiktiver Datenanalyse in der Produktentwicklung, wie sie auch in dieser Arbeit verwendet wird.

Comparison of Artificial Intelligence Techniques for Project Conceptual Cost Prediction: A Case Study and Comparative Analysis nach ELMOUSALAMI

Das Ziel der Arbeit von ELMOUSALAMI²⁶⁷ ist es, eine umfassende Vergleichsanalyse für künstliche Intelligenz Modelle zur Konzeptkostenmodellierung in der Baubranche durchzuführen, um die bisherigen Einschränkungen zu überwinden. Zu Beginn wird ein fünfstufiger Prozess vorgestellt, welcher die Datenerhebung, Merkmalsauswahl,

²⁶⁶ Dölle (2018), Projektsteuerung in der Produktentwicklung mittels Predictive Analytics

²⁶⁷ Elmousalami (2021), Comparison of Artificial Intelligence Techniques for Project Conceptual Cost Prediction: A Case Study and Comparative Analysis

Modellentwicklung, Modellvalidierung und Ergebnisanalyse beinhalten. Anschließend werden 20 KI-Techniken, wie z.B. Fuzzy-Logik, künstliche neuronale Netze, multiple Regressionsanalyse, Fallbasiertes Schließen, hybride Modelle und Ensemble-Lernmethoden untersucht. Dabei werden die Modelle auf die konzeptuelle Kostenprognose von Feldkanalverbesserungsprojekten in Ägypten als Fallbeispiel angewendet. Anschließend werden die mittlere absolute prozentuale Abweichung und der Bestimmtheitskoeffizienten als Evaluierungskriterium angewendet. Dabei zeigt das skalierbare Boosting-Baum-Modell die besten Ergebnisse für die Kostenprognose. Im Gegensatz zu der hier vorliegenden Arbeit werden lediglich konzeptionelle Kostenschätzungen vorhergesagt, nicht jedoch die realen Kosten der Projekte. Weiterhin wird die produzierende Industrie nicht betrachtet.

Data Analysis in Engineering Change Management – Improving Collaboration by Assessing Organizational Dependencies Based on Past Engineering Change Information nach KATTNER ET AL.

Das Ziel der Arbeit von KATTNER ET AL.²⁶⁸ ist es, organisatorische Abhängigkeiten auf Basis von vergangenen technischen Änderungen abzuleiten. Hierzu werden diese Informationen genutzt, um ein Meta-Modell auf Basis von grafenbasierten Analysen aufzubauen. Weiterhin wird der Ansatz des strukturellen Komplexitätsmanagements genutzt, um die Daten und Systeme sowie deren Abhängigkeiten zu analysieren. Hieraus werden anschließend Regeln zu den Abhängigkeiten der Organisationsbereiche untereinander abgeleitet. Das Modell wurde anschließend auf insgesamt 1625 technische Änderungsanfragen angewendet, wodurch Abhängigkeiten identifiziert werden konnten. Sodann wurden die kritischen Abhängigkeiten über Aktiv- und Passivsummen identifiziert. Auf Basis der Analysen können insbesondere die Abteilungen oder Personen identifiziert werden, welche einen hohen Anteil an der Erstellung oder Bearbeitung technischer Änderungsanfragen haben. Die Informationen unterstützen dabei die Prozesse des Änderungsmanagements. Der Ansatz bietet somit eine interessante Möglichkeit zur Nutzung der Daten von technischen Änderungen, fokussiert jedoch nicht die in dieser Arbeit vorliegende Thematik der Vorhersage des Aufwands technischer Änderungen.

²⁶⁸ Kattner et al. (2018), Data Analysis in Engineering Change Management – Improving Collaboration by Assessing Organizational Dependencies Based on Past Engineering Change Information

Comparison of Machine Learning methods applied to the estimation of manufacturing cost of jet engine components nach LOYER ET AL.

Das Ziel der Arbeit nach LOYER ET AL.²⁶⁹ ist es, fünf statistische Verfahren zur Vorhersage der Fertigungskosten einer Flugzeugturbine während der frühen Entwicklungsphase miteinander zu vergleichen. Zu diesem Zweck wurden reale Industriedaten verwendet. Hierzu wurden zu Beginn verschiedene Einflussfaktoren definiert, welche dazu genutzt werden können, die Fertigungskosten einer Flugzeugturbine vorherzusagen. Anschließend werden die Verfahren Gradient-Boosted Trees, Support Vector Regression, Multiple Linear Regression, Artificial Neural Networks und Generalized Additive Models untersucht. Gradient-Boosted Trees zeigen dabei die geringsten Fehler mit einer mittleren absoluten Abweichung von 6%. Zusammenfassend kommen die Autoren zu der Aussage, dass Maschinelles Lernen eine effektive, erschwingliche, genaue und skalierbare Technik ist, um Kosten mechanischer Teile in der frühen Phase des Konstruktionsprozesses zu planen. Im Gegensatz zur vorliegenden Dissertation zielt die beschriebene Arbeit auf einen anderen Objektbereich ab. Weiterhin wird nur eine geringe Anzahl an Inputvariablen zur Vorhersage der Fertigungskosten genutzt.

An interpretable machine learning approach for engineering change management decision support in automotive industry nach PAN ET AL.

In der Arbeit nach PAN ET AL.²⁷⁰ wird eine maschinelle Lernlösung entwickelt, die die Auswirkungen und die Dauer von Änderungsanforderungen im Engineering vorher sagt und erklärt. Die Lösung soll die Qualität, Effizienz und Transparenz der bestehenden Prozesse verbessern. Hierzu werden reale Daten von einem Automobilhersteller verwendet. Dabei werden Community Detection und Stacking Algorithmen angewendet, um robustere Modelle zu erstellen. Die Lösung wurde mit Industrieexperten evaluiert, die die Vorhersagen und Erklärungen der Modelle als nützlich und verständlich bewerteten. Die Lösung wurde als positiver Beitrag zur Unterstützung der Entscheidungsfindung im Engineering anerkannt. Jedoch werden hierbei keine genauen Kosten der Änderungen vorhergesagt, sondern lediglich die Abhängigkeiten dieser aufgezeigt. Weiterhin wird auch auf die Herausforderungen bezüglich der Datenqualität, der Modellauswahl, der Interpretierbarkeit und der Vertrauenswürdigkeit der Lösung eingegangen. Diese Herausforderungen müssen auch in der hier vorliegenden Arbeit berücksichtigt werden.

²⁶⁹ Loyer et al. (2016), Comparison of Machine Learning methods applied to the estimation of manufacturing cost of jet engine components

²⁷⁰ Pan et al. (2022), An interpretable machine learning approach for engineering change management decision support in automotive industry

Applying the Random Forest Algorithm to Predict Engineering Change Effort nach RIESENER ET AL.

RIESENER²⁷¹ beschreibt eine Methodik der Modellerstellung zur Vorhersage des Aufwands für technische Änderungsanforderungen. Dazu wird zunächst ein Beschreibungsmodell für technische Änderungen eingeführt. Anschließend müssen die vorhandenen Änderungsdaten mithilfe des Beschreibungsmodells in einen Datensatz übertragen werden. Der erstellte Datensatz wird in Trainings- und Testdaten aufgeteilt, um die Vorhersagequalität für ungesehene Änderungsanträge zu ermitteln. Anschließend wird das Vorhersagemodell erstellt. Die Ergebnisse des Vorhersagemodells werden vorgestellt und diskutiert. Außerdem werden in der Schlussfolgerung weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Vorhersage vorgeschlagen. Basierend auf diesem Ansatz wird die in dieser Arbeit entwickelte Methodik aufgebaut. Zusätzlich werden Grundtypen technischer Änderung als Verbesserung durch die Verringerung der Inputvariablen eingebacht.

Data-based improvement of engineering change impact analyses in manufacturing nach SCHUH ET AL.

In der Arbeit nach SCHUH ET AL.²⁷² wird das Potenzial von datenbasierten Methoden zur Verbesserung der Qualität und Geschwindigkeit bei der Analyse des Einflusses von technischen Änderungen auf die Fertigung untersucht. Hierzu werden zu Beginn relevanter Begriffe des Änderungsmanagements an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Fertigung definiert. Anschließend wird mittels einer Literaturanalyse der Forschungsbedarf für dieses Thema ausgearbeitet. Es wird insbesondere beschrieben, welche Limitationen in den aktuellen vorliegen, bevor ein Datenbasiertes Konzept zur Einflussanalyse von Engineering Changes auf die Fertigung vorgestellt wird. Hierbei sollen Vergangenheitsdaten genutzt werden, um möglichst exakte Modelle der Fertigung aufbauen zu können. Somit können einzelne Änderungen in der Produktionsvorgaben und deren Auswirkung untersucht werden. Die Arbeit stellt dabei lediglich das Konzept vor, detailliert dieses aber nicht weiter. Außerdem werden keine Aufwände technischer Änderungen vorhergesagt.

²⁷¹ Riesener et al. (2021), Applying the Random Forest Algorithm to Predict Engineering Change Effort

²⁷² Schuh et al. (2021), Data-based improvement of engineering change impact analyses in manufacturing

Änderungen besser managen – Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen nach WICKEL

Das Ziel der Arbeit von WICKEL²⁷³ ist, den strategischen und operativen Umgang mit technischen Änderungen zu verbessern. Hierbei wird auf die Entwicklung von komplexen technischen Systemen Bezug genommen. Dieses Ziel wird durch die Identifikation, Quantifizierung und Modellierung von änderungsbedingten Abhängigkeiten anhand der Nutzung von Änderungsdaten erreicht. Hervorzuheben in dieser Arbeit ist, dass WICKEL Data-Mining-Verfahren und Knowledge Discovery in Databases anwendet. Ergebnis der Arbeit ist zum einen die modellierte Änderungsabhängigkeit zwischen den Komponenten zur Vermeidung und Vorverlagerung von Änderungen. Zum anderen werden basierend auf einer ermittelten Auftretenswahrscheinlichkeit für Komponenten Änderungsumfänge und Auswirkungen bestimmt, welche den laufenden Änderungsprozess unterstützen. In Abgrenzung zur hier vorliegenden Arbeit nutzt WICKEL ebenfalls Daten von technischen Änderungen sowie unterschiedliche Data-Mining-Verfahren, jedoch werden diese nicht zur Vorhersage von Aufwänden für technische Änderungen genutzt. Weiterhin erfolgt zwar eine Beschreibung technischer Änderungen auf Basis von Attributen, jedoch werden keine generalisierten Änderungstypen gebildet.

3.2.3 Bewertung bestehender Ansätze und Positionierung der Arbeit

Nachdem in den vorherigen Teilkapitel die bestehenden Ansätze vorgestellt wurden, erfolgt in diesem Kapitel eine statistische Auswertung der Ansätze bezogen auf die Art und das Jahr der Publikation sowie die Sprache (siehe Abbildung 3-6). Weiterhin erfolgt eine Gegenüberstellung der Ansätze mit den in 3.2.1 vorgestellten Bewertungskriterien (siehe Abbildung 3-7). Auf Basis dieser Gegenüberstellung und einer Korrelationsanalyse der Bewertungskriterien (siehe Abbildung 3-8) kann anschließend das vorliegende Forschungsdefizit abgeleitet werden.

Bei der Auswahl der Literatur wurde neben dem Themenbezug der Arbeiten auf weitere Merkmale geachtet. Es wurden maßgeblich wissenschaftliche Veröffentlichungen und Dissertationen für die Analyse in Betracht gezogen. Weiterhin ist die Mehrheit der Literatur dem internationalen Publikum zugänglich und in englischer Sprache verfasst. Die Vielzahl deutscher Werke lässt sich insbesondere mit der starken Forschungskonzentration zum Thema des Änderungsmanagements an deutschen Hochschulen erklären. Weiterhin wurde auf die Aktualität der Werke Wert gelegt. Hierdurch wurde der neuste Wissensstand zum Thema sichergestellt.

²⁷³ Wickel (2017), Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen

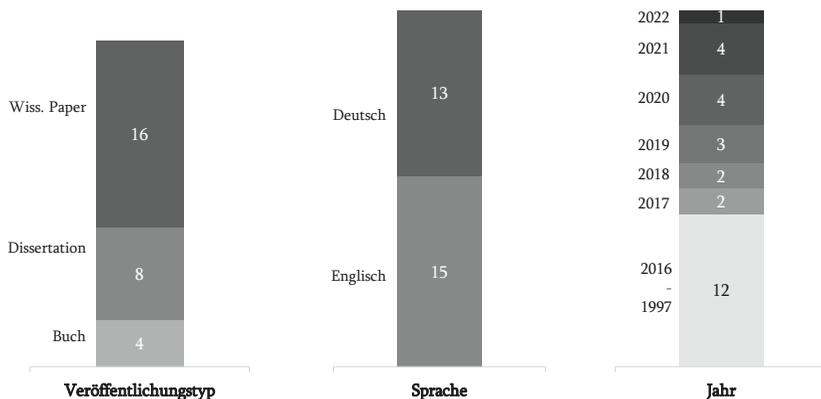


Abbildung 3-6: Statistische Auswertung der ausgewählten Literatur

Neben der statistischen Auswertung der untersuchten Literatur wurde insbesondere der Themenbezug im Hinblick auf das Forschungsvorhaben untersucht. Hierzu wurden in Teilkapitel 3.2.1 bereits Kriterien zur Bewertung der bestehenden Ansätze vorgestellt. Weiterhin wurden in Teilkapitel 3.2.2 die bestehenden Ansätze beschrieben. Diese werden nachfolgend gegenübergestellt. Es wird deutlich, dass einige Aspekte im Zusammenhang mit dem Forschungsvorhaben bereits in der Literatur adressiert wurden, andere jedoch nicht. Dabei wird anhand des Erfüllungsgrads ein Forschungsdefizit insbesondere in den Bereichen der Zusammenhänge von technischen Änderungen und deren Aufwand und Nutzen identifiziert. Weiterhin fehlt es an geeigneten Methoden zur Bündelung von technischen Änderungen sowie der Nutzung von prädiktiver Datenanalyse, was die Lösungshypothese der vorliegenden Arbeit darstellt.

	Objektbereich					Zielbereich					LH	
	Betrachtung produzierender Industrie	Betrachtung technischer Produkte	Berücksichtigung technischer Änderungen	Berücksichtigung Umsetzungs-kosten technischer Änderungen	Berücksichtigung des Nutzens technischer Änderungen	Beschreibung technischer Änderungen	Ermittlung der Grundtypen technischer Änderungen	Zusammenhänge technischer Änderungen mit Aufwand & Nutzen	Bündelung von Änderungen	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen	Anwendung von prädiktiver Datenanalyse	Ø (Gesamt-) Erfüllungsgrad
I) Ansätze zu Grundlagen des technischen Änderungsmanagements												
ARICA ET AL., 2020	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
JARRATT ET AL., 2011	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LANGER, 2016	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LINDEMANN ET AL., 1998	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SCHUH, 2012	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
TALE-YAZDI ET AL., 2019	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
II) Ansätze zur Beschreibung von Typen technischer Änderungen												
ARMANN, 2000	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
BELENER, 2008	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
EVERSHEIM ET AL., 1997	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
RIESENER ET AL., 2019	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
III) Ansätze zum Change Propagation Management												
GRÄBLER, 2021	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
HAMRAZ, 2013	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
KÖHLER, 2009	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
YEASIN ET AL., 2018	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
IV) Ansätze zur Beschreibung von Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen												
ALEKSIC, 2015	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
CONRAT NIEMERG, 1997	●	○	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
GEBHARDT, 2018	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
REBENTISCH ET AL., 2017	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SJÖGREN ET AL., 2019	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
V) Ansätze zur Anwendung von datenbasierten Verfahren im technischen Änderungsmanagement												
CHAKRABORTY ET AL., 2020	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
DOLLE, 2018	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ELMOUSALAMI, 2021	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
KÄTTNER ET AL., 2019	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
LOYER ET AL., 2016	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
PAN ET AL., 2022	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
RIESENER ET AL., 2021	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
SCHUH ET AL., 2021	●	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○
WICKEL, 2017	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Ø Häufigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

Abbildung 3-7: Bewertung der analysierten Ansätze

Neben dem Erfüllungsgrad der einzelnen Kriterien aus Objekt- und Zielbereich konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden. Mithilfe des durchschnittlichen (Gesamt)Erfüllungsgrads zeigt sich, dass keiner der gefundenen Ansätze das Forschungsvorhaben vollständig erfüllt. Weiterhin kann mithilfe der Betrachtung der einzelnen Kategorien gezeigt werden, dass unterschiedliche Forschungscluster bei der Untersuchung von technischen Änderungen vorhanden sind. All diese Forschungsansätze spielen bei dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben eine Rolle und wurden deshalb betrachtet. Hierbei lässt sich unter anderem feststellen, dass Ansätze, die sich mit den Grundlagen des technischen Änderungsmanagements beschäftigen, keinen Bezug zu Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen haben. Das Gleiche gilt für Arbeiten aus dem Kontext der Beschreibung von Typen technischer Änderungen. Ansätze aus dem Bereich des Change-Propagation-Managements wiederum untersuchen teilweise Aufwand und Nutzen technischer Änderung und liefern Umsetzungsempfehlungen, jedoch nicht auf Basis von Grundtypen technischer Änderungen. Dies gilt ebenfalls für die Ansätze zur Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen. Die wenigen datenbasierten Ansätze im technischen Änderungsmanagement wiederum untersuchen häufig keine Bündelung von Änderungen und leiten keine Umsetzungsempfehlungen ab. Außerdem werden prädiktive Verfahren nur selten berücksichtigt. Zur weiteren Untersuchung und um die Forschungslücken aufzuzeigen, wurde nachfolgend eine Korrelationsanalyse zwischen den einzelnen Objekt- und Zielbereichen durchgeführt.

Bei der Korrelationsanalyse der Kriterien wird zwischen einer negativen Korrelation (-1), keiner Korrelation (0) und einer positiven Korrelation (1) unterschieden. Negative Korrelationen bedeuten, dass eine Zunahme des ersten Erfüllungskriteriums A zu einer Abnahme des zweiten Erfüllungskriteriums B führt. Keine Korrelation bedeutet, dass zwei Erfüllungskriterien unabhängig voneinander sind und sich kein Zusammenhang zwischen der Zu- und Abnahme einzelner Kriterien herstellen lässt. Positive Korrelation bedeutet, dass eine Zunahme des ersten Erfüllungskriteriums A eine Zunahme des zweiten Erfüllungskriteriums B zur Folge hat.

Nachdem die Bedeutung der Korrelationen dargelegt wurde, erfolgt anschließend die Beschreibung der Erkenntnisse aus der Korrelationsanalyse. Auf Basis der Untersuchung der Korrelationen sind im Hinblick auf das vorliegende Forschungsvorhaben zwei Besonderheiten festzustellen. Als Erstes kann festgestellt werden, dass Arbeiten, welche den Objektbereich der Berücksichtigung von Umsetzungskosten technischer Änderungen adressieren, sich häufig auch mit den Zusammenhängen zu den technischen Änderungen selbst sowie der Ableitung von Umsetzungsempfehlungen auseinandersetzen.

		<i>Objektbereich</i>					<i>Zielbereich</i>					<i>LH</i>
		Betrachtung produzierender Industrie	Betrachtung technischer Produkte	Berücksichtigung technischer Änderungen	Berücksichtigung Umsetzungskosten technischer Änderungen	Berücksichtigung des Nutzens technischer Änderungen	Beschreibung techn. Änderungen	Ermittlung der Grundtypen technischer Änderungen	Ermittlung der Zusammenhänge techn. Änderungen mit Aufwand & Nutzen	Bündelung von Änderungen	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen	Anwendung von prädiktiver Datenanalyse
<i>Objektbereich</i>	Betrachtung produzierender Industrie	1,00										
	Betrachtung techn. Produkte	-0,11	1,00									
	Berücksichtigung techn. Änderungen	-0,08	0,28	1,00								
	Berücksichtigung Umsetzungskosten techn. Änderungen	-0,20	0,26	0,29	1,00							
	Berücksichtigung des Nutzens techn. Änderungen	0,08	0,17	0,19	0,29	1,00						
<i>Zielbereich</i>	Beschreibung techn. Änderungen	-0,12	-0,13	0,51	0,12	-0,03	1,00					
	Ermittlung der Grundtypen technischer Änderungen	0,07	-0,36	0,15	-0,20	-0,04	0,43	1,00				
	Ermittlung der Zusammenhänge techn. Änderungen mit Aufwand & Nutzen	-0,16	0,17	0,24	0,70	0,04	-0,11	-0,19	1,00			
	Bündelung von Änderungen	0,07	0,19	0,15	0,41	0,71	-0,10	-0,12	0,17	1,00		
	Ableitung von Umsetzungsempfehlungen	0,10	-0,27	0,18	0,37	0,48	0,17	0,41	0,20	0,56	1,00	
<i>LH</i>	Anwendung von prädiktiver Datenanalyse	0,13	-0,07	-0,63	0,00	-0,30	-0,27	-0,24	0,17	-0,24	-0,37	1,00

Abbildung 3-8: Korrelationsanalyse der Erfüllungsgrade

Diese Aussagen lassen sich durch eine mittlere positive Korrelation untermauern. Als Zweites kann gezeigt werden, dass Arbeiten, welche technische Änderungen berücksichtigen, nur sehr selten auf die Anwendung prädiktiver Datenanalyse zurückgreifen.

Zwischen der Anwendung prädiktiver Datenanalyse zur Beschreibung von Zusammenhängen zwischen technischen Änderungen und deren Aufwand und Nutzen lässt sich keine Korrelation feststellen.

3.3 Zwischenfazit: Forschungsbedarf zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen

Ziel des dritten Kapitels war es, die Bewertung der bestehenden Ansätze im Kontext der Arbeit aufzuzeigen sowie den Forschungsbedarf für die Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse aufzuzeigen. Hierzu wurden sowohl Herausforderungen aus der Praxis als auch die bestehenden Ansätze aus der Theorie beschrieben. Abschließend wird mittels eines Zwischenfazits der Handlungsbedarf zusammengefasst.

Als **Herausforderung in der Praxis** ist die steigende Anzahl an technischen Änderungen durch komplexere Produkte und kürzere Innovationszyklen anzuführen. Als Folge hieraus wird die bereits jetzt starke Ressourcenbindung von Entwicklungskapazitäten für technische Änderungen weiter zunehmen, so dass die Bedeutung der Auswahl der richtigen technischen Änderungen wichtiger wird. Das Ziel ist es, diese Herausforderungen mittels einer gesteigerten Effektivität und Effizienz im Änderungsmanagement zu begegnen, was auf Basis von Daten und prädiktiver Datenanalyse erfolgen kann.

Ein bestehendes **Theoriedefizit** konnte sowohl im Objekt- und Zielbereich als auch in der Lösungshypothese identifiziert werden. Die bestehende Literatur beschäftigt sich weitestgehend entweder mit der Ermittlung von Typen technischer Änderungen oder mit der Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, betrachtet diese aber nicht integriert. Weiterhin konnte mittels einer Korrelationsanalyse aufgezeigt werden, dass prädiktive Datenanalyse nur sehr selten im Kontext von technischen Änderungen genannt wird und es keine Ansätze zur Vorhersage von Aufwand und Nutzen auf Basis von Typen und unter Nutzung prädiktiver Datenanalyse gibt.

Ausgehend von dieser Zusammenfassung soll im nachfolgenden Kapitel ein Konzept zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse erarbeitet werden, welches auf die genannten Herausforderungen reagiert. Hierzu werden einleitend grundlegende Anforderungen an die Methodik beschrieben. Anschließend erfolgt eine Beschreibung des Grobkonzepts und der sich daraus ableitenden Teilmodelle.

4 Konzept der Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse

Aufbauend auf den in Kapitel 2 und 3 hergeleiteten Grundlagen zum technischen Änderungsmanagement, den Grundlagen zur Datenanalyse mit dem Fokus auf dem Maschinellen Lernen als Prognoseverfahren und dem aufgezeigten Praxis- und Theorie-defizit dient dieses Kapitel der Gestaltung des Grobkonzepts. Dies entspricht dem zugrunde liegenden Forschungsprozess nach ULRICH. Hierzu wird eingangs anhand eines Zielbildes die zu entwickelnde Methodik vorgestellt (Unterkapitel 4.1). Anschließend werden sowohl inhaltliche als auch formale Anforderungen an die Methodik hergeleitet (Unterkapitel 4.2). Eine Methodik wird dabei als planmäßige Verfahrensweise definiert, welche unter Zuhilfenahme von Strategien, Methoden, Werkzeugen und Hilfsmitteln die Erreichung eines bestimmten Ziels verfolgt.²⁷⁴ Es erfolgt eine Darstellung des angestrebten Nutzens der Methodik (Unterkapitel 4.3), bevor auf deren einzelne Schritte eingegangen wird (Unterkapitel 4.4). Ausgehend hiervon werden die Teilmodelle in Unterkapitel 4.5 abgeleitet, bevor das Kapitel mit einem Zwischenfazit (Unterkapitel 4.6) endet.

4.1 Zielbild zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse

Das übergeordnete Ziel der Methodik kann mithilfe eines Zielbildes dargestellt werden. Ein Zielbild dient insbesondere im Bereich der prädiktiven Datenanalyse auch der Erarbeitung der Methodik selbst.²⁷⁵ Außerdem kann die Methodenentwicklung anhand des Leitbildes kontinuierlich überprüft werden.

Das technische Änderungsmanagement kann als ein Teillelement des Projektmanagements angesehen werden.²⁷⁶ Es umfasst zum einen die Gesamtheit der Maßnahmen zur Vermeidung und gezielten Vorverlagerung von technischen Änderungen und zum anderen Handlungen zur effizienten und effektiven Planung, Bewertung und Umsetzung technischer Änderungen im Unternehmen.²⁷⁷ Im Kontext der vorliegenden Arbeit gilt

²⁷⁴ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2013), Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, S. 146

²⁷⁵ Vgl. Armstrong (2001), Principles of forecasting, S. 1

²⁷⁶ Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung, S. 43

²⁷⁷ Vgl. Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 51ff.

es eine Entscheidungsunterstützung zur Auswahl wirtschaftlicher technischer Änderungen zu entwickeln. Der Änderungsprozess wurde hierzu bereits in Teilkapitel 2.2.2 beschrieben. Außerdem wurden Auswirkungen technischer Änderungen auf Prozesse, Ressourcen und Kosten in Teilkapitel 2.2.3 dargestellt.

Die Prognose der Aufwände technischer Änderungen ist dabei eine besondere Herausforderung. Häufig ist sie unzutreffend, so dass eine Planung der Ressourcen für die Durchführung einer technischen Änderung auch in der Entwicklung und anderen Unternehmensbereichen schwierig ist. Außerdem beanspruchen technische Änderungen einen hohen Anteil der Kapazitäten sowohl aus der Entwicklung als auch aus anderen Unternehmensbereichen.²⁷⁸ Die hier zu entwickelnde Methodik zielt zum einen auf die Verbesserung der Prognosegüte der Aufwände technischer Änderungen ab. Hierzu werden Methoden der prädiktiven Datenanalyse genutzt. Zum anderen unterstützt die Methodik bei der Minimierung des Gesamtänderungsaufwands. Hierzu wird die Prognose der Gesamtänderungsaufwände genutzt, um diese anschließend durch Bündelung von technischen Änderungen zu minimieren.

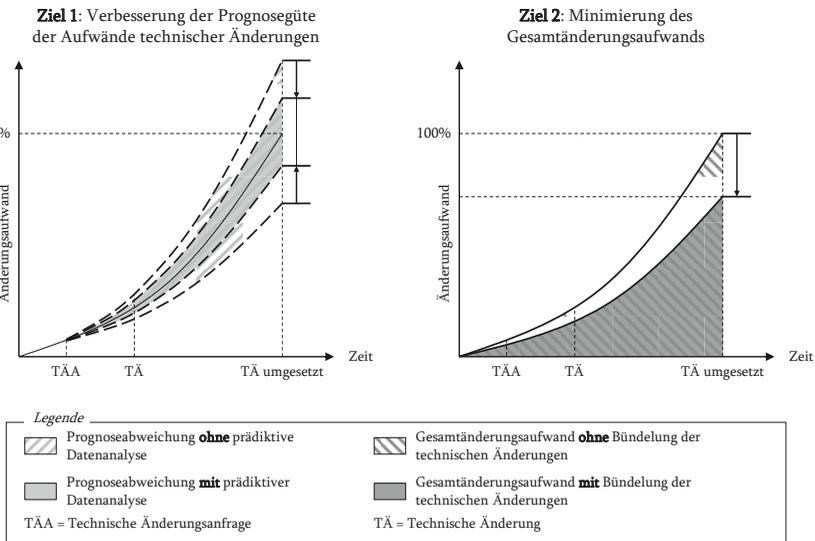


Abbildung 4-1: Zielbild der Methodik

²⁷⁸ Vgl. Kattner et al. (2019), An Approach to Assess Engineering Change Effort Retrospectively Utilizing Past Engineering Change Information, S. 223f.; Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 7; Fricke et al. (2000), Coping with changes, S. 170

Dem Zielbild folgend ist die Prognose von Änderungsaufwänden technischer Änderungen der Kern der Methodik. Die verbesserte Prognose, insbesondere im Hinblick auf die Zuordnung der Aufwände zu unterschiedlichen Unternehmensbereichen, ermöglicht die nachfolgende Minimierung des Gesamtänderungsaufwands durch Bündelung technischer Änderungen. Nach der Darstellung des Zielbilds erfolgt die Ableitung der Anforderungen an die Methodik.

4.2 Anforderungen an die Methodik

Ziel dieses Unterkapitels ist es, inhaltliche und formale Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik vorzustellen. Ausgehend von diesen Anforderungen kann anschließend das Grobkonzept zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse abgeleitet werden.

4.2.1 Inhaltliche Anforderungen

Die inhaltlichen Anforderungen an die Arbeit können in Zielsetzung der Arbeit, Objektbereich der Arbeit, Defizit in der Praxis und Defizit in der Theorie unterschieden werden (siehe Abbildung 4-2). Sie dienen als Basis für die systematische Ableitung des Grobkonzepts und unterstützen die zielgerichtete Entwicklung einer Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Außerdem führen die Anforderungen dazu, dass die entwickelte Methodik anschließend in der Validierung bewertet werden kann.

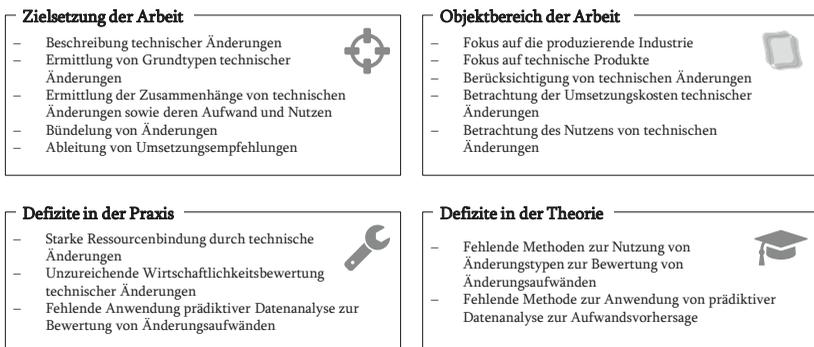


Abbildung 4-2: Inputfaktoren zur Ableitung der inhaltlichen Anforderungen

Die übergeordnete **Zielsetzung der Arbeit** ist die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung zur Minimierung der Gesamtänderungskosten. Hierzu müssen die Zusammenhänge zwischen den technischen Änderungen und deren Aufwänden ermittelt werden, wofür prädiktive Datenanalyse genutzt werden soll. Weiterhin muss der Nutzen von technischen Änderungen beschrieben werden, damit eine wirtschaftlich sinnvolle Umsetzungsempfehlung getroffen werden kann. Um Aufwand und Nutzen technischer Änderungen zu ermitteln, werden diese durch ein einheitliches Beschreibungsmodell dargestellt. Außerdem werden Typen technischer Änderungen abgeleitet, wodurch die Anzahl notwendiger Deskriptoren für die prädiktive Datenanalyse reduziert werden kann.

Aus dem **Objektbereich der Arbeit** folgt, dass der Fokus der zu entwickelnden Methodik auf technischen Produkten der produzierenden Industrie liegen soll. Dabei liegt der Fokus der Vorhersage auf dem Aufwand von technischen Änderungen. Neben der Vorhersage der Aufwände muss auch der Nutzen von technischen Änderungen bestimmt werden, da nur so eine Wirtschaftlichkeitsbewertung möglich ist.

Aus dem **Defizit der Praxis** folgt die Anforderung an die Methodik, dass die starke Ressourcenbindung in der Produktentwicklung durch technische Änderungen reduziert wird. Hierfür ist eine verlässliche Bewertung der Aufwände von technischen Änderungen notwendig, welche aktuell erfahrungsbasiert durchgeführt wird. Es fehlt eine Methode zur Nutzung der vorhandenen Daten durch prädiktive Datenanalyse. Durch diese ist eine verbesserte Aufwandsabschätzung für technische Änderungen möglich und sie ermöglicht wiederum eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit technischer Änderungen.

Aus dem **Defizit der Theorie** können weitere Anforderungen an die Methodik abgeleitet werden. Aktuell sind in der Literatur keine Methoden bekannt, welche durch die Anwendung von prädiktiver Datenanalyse Änderungsaufwände vorhersagen können. Damit eine Vorhersage durch prädiktive Datenanalyse möglich ist, müssen technische Änderungen entsprechend beschrieben werden. Dabei ist eine geringe Anzahl an Beschreibungsmerkmalen für die prädiktive Datenanalyse zu bevorzugen. Hieraus können Grundtypen technischer Änderungen abgeleitet werden.

4.2.2 Formale Anforderungen

Die zu entwickelnde Methodik muss neben den inhaltlichen Anforderungen auch formale Anforderungen erfüllen. Durch diese wird gewährleistet, dass das Modell neben der spezifischen Fragestellung auch die grundsätzlichen Anforderungen an das Modell

erfüllt, nämlich Anwendbarkeit und Richtigkeit der Methodik. Dazu werden die relevanten formalen Anforderungen in Anlehnung an PATZAK²⁷⁹ aufgeführt und erläutert. Die **formale Richtigkeit** stellt die Reproduzierbarkeit und Widerspruchsfreiheit der getätigten Aussagen sicher. Hierdurch ist das Modell nachprüfbar.

Die **empirische Richtigkeit** ist gegeben, wenn Abbildungseigenschaften des Modells und die Realität eine hinreichende Übereinstimmung aufweisen.

Die **Nutzerfreundlichkeit** stellt die Akzeptanz des Modells in der Praxis sicher. Hierzu soll ein Modell leicht anwendbar sein und die gelieferten Ergebnisse müssen für den Nutzer leicht interpretierbar sein.

Die **Zweckbezogenheit** des Modells sagt aus, dass ein Modell sowohl formal als auch inhaltlich nutzbar sein muss.

Die **Wirksamkeit** des Modells gibt das Aufwand-Nutzen-Verhältnis bei der Modellierung wieder. Nur wenn der Nutzen des Modells den Aufwand überwiegt, ist ein Modell als wirksam zu betrachten.

Zwischen den formulierten formalen Anforderungen können bei einer Gegenüberstellung Zielkonflikte identifiziert werden. Diese gilt es während der Erarbeitung aufzulösen und gegeneinander abzuwägen.²⁸⁰ So kann die Forderung nach empirischer und formaler Richtigkeit den Aufwand für die Erstellung und Anwendung des Modells stark vergrößern. Dies hat wiederum eine negative Auswirkung auf die Nutzerfreundlichkeit und Wirksamkeit des Modells. Der Zielkonflikt muss daher mittels zielorientierter Vereinfachung aufgelöst werden.²⁸¹ Weiterhin müssen zur Sicherstellung der Praxistauglichkeit ein Genauigkeitsverlust und eine Vereinfachung in Kauf genommen werden.²⁸² Notwendige Vereinfachungen können sich dabei auf unterschiedliche Elemente wie Randbedingungen, Beschränkungen oder Gestaltungsparameter beziehen.²⁸³

Bevor das Grobkonzept der Methodik in Unterkapitel 4.4 skizziert wird, soll der angestrebte Nutzen der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse im nächsten Unterkapitel definiert werden.

²⁷⁹ Vgl. Patzak (1982), Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme, S. 309

²⁸⁰ Vgl. Patzak (1982), Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme, S. 310

²⁸¹ Vgl. Dölle (2018), Projektsteuerung in der Produktentwicklung mittels Predictive Analytics, S. 98

²⁸² Vgl. Lenders (2009), Beschleunigung der Produktentwicklung durch Lösungsraum-Management, S. 103

²⁸³ Vgl. Patzak (1982), Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme, S. 315

4.3 Angestrebte Nutzenpotenziale der Methodik

Der Begriff der Nutzenpotenziale beschreibt nach PÜMPIN „eine in der Umwelt, im Markt oder in der Unternehmung latent oder effektiv vorhandene Konstellation, die durch Aktivitäten der Unternehmung zum Vorteil aller Bezugsgruppen erschlossen werden kann“²⁸⁴. Bezogen auf die vorliegende Arbeit werden daher in diesem Unterkapitel die Nutzenpotenziale einer Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse zur Minimierung der Gesamtänderungskosten vorgestellt. Dabei wird davon ausgegangen, dass durch die Realisierung dieses Nutzenpotenzials die Wettbewerbsposition des Unternehmens gestärkt werden kann.²⁸⁵

Ausgehend von den in Unterkapitel 4.1 vorgestellten Zielen werden die Nutzenpotenziale der Methodik abgeleitet. Als unmittelbarer Nutzen der verbesserten Prognosegüte für die Aufwände von technischen Änderungen ist die verbesserte Auswahl von wirtschaftlichen technischen Änderungen hervorzuheben. Sind Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen mit geringem Prognosefehler bekannt, so ist die Gefahr der Auswahl von unwirtschaftlichen technischen Änderungen als geringer anzusehen, als es bei großen Prognosefehlern der Fall wäre. Folglich steigt die Effektivität des technischen Änderungsmanagements.

Aus dem zweiten Ziel, der Minimierung des Gesamtänderungsaufwands, ergibt sich das Nutzenpotenzial des verringerten Ressourcenverbrauchs entlang des Produktentstehungsprozesses. Durch die Bündelung von technischen Änderungen können einzelne Aktivitäten zusammengeführt werden, wodurch Ressourcen geschont und damit Kosten reduziert werden können. Die Bündelung von Änderungen stellt dabei im Allgemeinen ein gängiges Verfahren zur Aufwandsminimierung technischer Änderungen dar.²⁸⁶ Daraus folgt eine gesteigerte Effizienz des technischen Änderungsmanagements, da das gleiche Ergebnis bei einem geringeren Ressourcenverzehr erzielt wird. Insbesondere vor dem Hintergrund der kürzeren Lebenszyklen von Produkten, kürzeren Entwicklungszeiten und der zunehmenden Globalisierung der Entwicklungen ist ein effektives und effizientes technisches Änderungsmanagement als notwendig anzusehen.²⁸⁷

In Abbildung 4-3 ist der Nutzen des Verfahrens schematisch dargestellt, wobei hier zur Vereinfachung ein linearer Zusammenhang zwischen der Anzahl technischer Änderungen und dem Aufwand angenommen wird. Werden technische Änderungen

²⁸⁴ Pümpin (1992), Das Dynamik-Prinzip, S. 47

²⁸⁵ Vgl. Pümpin et al. (2005), SEP, S. 25ff.

²⁸⁶ Vgl. Schuh (2012), Innovationsmanagement, S. 235; Vgl. Lindemann (2016), Handbuch Produktentwicklung

²⁸⁷ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 4; Vgl. Deubzer et al. (2005), Der Änderungsmanagement Report 2005

mithilfe der verbesserten Prognosegüte der Bewertung als unwirtschaftlich deklariert und nicht durchgeführt oder mit weiteren technischen Änderungen gebündelt, kann die Gesamtanzahl der durchzuführenden technischen Änderungen reduziert werden. Hierdurch wird ebenfalls der notwendige Aufwand reduziert, so dass mehr Ressourcen entlang des Produktentstehungsprozesses für andere Aktivitäten zur Verfügung stehen.

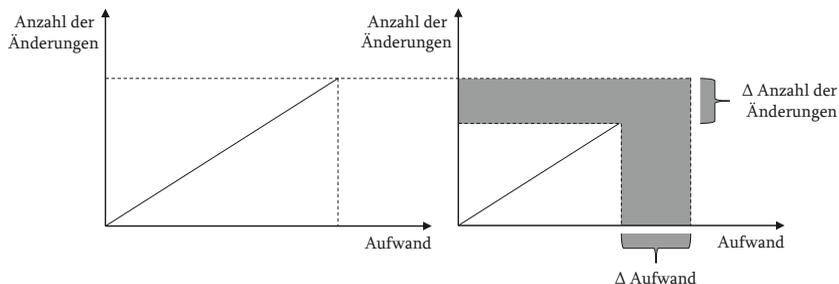


Abbildung 4-3: Nutzenpotenziale durch die verbesserte Prognosegüte und Bündelung von technischen Änderungen

Nachdem die Nutzenpotenziale der Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse vorgestellt wurden, erfolgt im Unterkapitel 4.4 die Darstellung des Grobkonzepts der Methodik.

4.4 Grobkonzept der Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse

Ziel dieses Unterkapitels ist die Entwicklung des Grobkonzepts zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Das Modell besteht aus fünf Teilmodellen. Das Konzept zur Erarbeitung dieser Teilmodelle sowie deren Kombination zum Gesamtmodell wird im Folgenden vorgestellt. Dabei wird entsprechend dem Zielbild (vgl. Unterkapitel 4.1) vorgegangen. Für die Erarbeitung eines Verfahrens zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse wird auf das CRISP-DM-Modell zurückgegriffen (vgl. Teilkapitel 2.3.2). Hierzu werden die einzelnen Methodikschritte entlang den Phasen des CRISP-DM eingeordnet (siehe Abbildung 4-4).

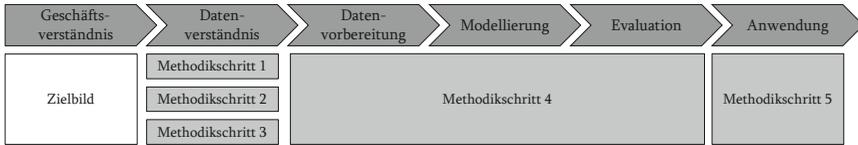


Abbildung 4-4: Ordnungsrahmen zur Grobkonzeption²⁸⁸

Die erste Phase des CRISP-DM wird als Phase des Geschäftsverständnisses bezeichnet. Das Ziel der Phase ist es, das Problem im Kontext der Anwendungsdomäne zu durchdringen und in Form eines Data-Mining-Problems zu formulieren. Diese Phase ist bereits durch Unterkapitel 4.1 und das hier erstellte Zielbild zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse abgeschlossen.

In der zweiten Phase wird das Datenverständnis erarbeitet. Im Kontext der vorliegenden Arbeit sind die Daten noch nicht vorhanden, so dass ein Großteil des Aufwands in dieser Phase anfällt. Da die Daten bezüglich technischer Änderungen i.d.R. unternehmensspezifisch sind, gilt es ein allgemeingültiges Modell zur Repräsentation der Daten aufzubauen. Das Ziel ist es, zu beschreiben, wie die vorhandenen Daten in einen verwendbaren Datensatz zur Bewertung technischer Änderungen überführt werden können. Zum Aufbau dieses Datensatzes werden die Methodikschritte 1–3 genutzt.

Innerhalb des ersten Methodikschritts werden technische Änderungen, als zu bewertendes Objekt dieser Arbeit, beschrieben. Zur einheitlichen Beschreibung der Objekte sollen Merkmale und Ausprägungen verwendet werden. Anschließend können mittels des zweiten Methodikschritts Grundtypen technischer Änderungen abgeleitet werden. Hierdurch kann die Anzahl der notwendigen Inputvariablen, also der Variablen, welche durch den Algorithmus zur Prädiktion der Aufwände dienen, reduziert werden.

Nachdem die technischen Änderungen als Objekte der Vorhersage beschrieben wurden, muss eine Beschreibung des Zielsystems erfolgen. Dies findet in Methodikschritt 3 statt. Im Kontext der Arbeit sollen die Aufwände technischer Änderungen prognostiziert werden. Hierzu muss eine Beschreibung der Zusammensetzung dieser Aufwendungen erfolgen. Dabei ist zu beachten, dass lediglich Aufwände prognostizierbar sind, welche sich auch innerhalb der Unternehmensdaten wiederfinden und sich einer Änderung zuordnen lassen.

Auf Basis der Beschreibung des Objekt- sowie des Zielbereichs wird in Methodikschritt 4 ein Prädiktionsmodell zur Aufwandsabschätzung von technischen Änderungen er-

²⁸⁸ Vgl. Chapman et al. (2000), CRISP-DM 1.0, S. 9ff.

mittelt. Hierzu werden die Daten auf Basis der zuvor erarbeitenden Modelle vorbereitet. Als Ergebnis der Datenvorbereitung steht ein Datensatz zur Verfügung, mit welchem ein Prädiktionsmodell trainiert werden kann. Das Ziel der Modellierung ist es, Wissen durch die Anwendung eines Algorithmus auf den zuvor definierten Datensatz zu erlangen. Hierzu werden entsprechende Parameter des Algorithmus festgelegt. Neben dem Trainieren erfolgt auch die Evaluation des Algorithmus, so dass anschließend eine Anwendung des Algorithmus erfolgen kann. Dabei wird das Trainieren, Evaluieren und Anwenden des Algorithmus iterativ durchgeführt, wodurch der Algorithmus mittels Hyperparameteroptimierung verbessert werden kann.

Im letzten Schritt der Methodik werden Handlungsempfehlungen zur Minimierung der Gesamtänderungskosten technischer Änderungen abgeleitet. Hierbei werden die Beschreibung technischer Änderungen, deren Grundtypen sowie der Algorithmus zur Vorhersage von Änderungsaufwänden genutzt.

Im nachfolgenden Teilkapitel erfolgt eine kurze Vorstellung der inhaltlichen Schwerpunkte der Methodikschritte.

4.4.1 Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen

Um eine Prognose von Änderungsaufwänden zu ermöglichen, ist eine datenbasierte Beschreibung von technischen Änderungen notwendig. Hierzu gilt es eine Systematik zur Strukturierung der Daten technischer Änderungen zu entwickeln.

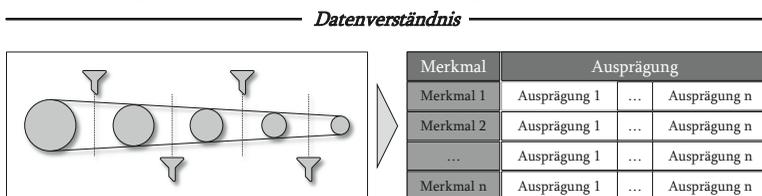


Abbildung 4-5: Konzept zur Ermittlung von Beschreibungsmerkmalen

Zur Ermittlung von bestehenden Beschreibungsmodellen technischer Änderungen soll eine systematische Literaturanalyse durchgeführt werden. Dabei dient der morphologische Ansatz nach ZWICKY²⁸⁹ zur Orientierung. Hier erfolgt die Beschreibung auf Basis von Merkmalen und Ausprägungen. Die in der Literatur vorhandenen Beschreibungsmodelle werden hinsichtlich ihrer Merkmale und Ausprägungen untersucht. Anschließend ist es notwendig, basierend auf den Analyseergebnissen ein Vorgehen zur Konsolidierung der Beschreibungselemente durchzuführen. Zur Konsolidierung der

²⁸⁹ Vgl. Zwicky (1989), Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild

Merkmale soll eine Design Structure Matrix nach BROWNING²⁹⁰ genutzt werden. Hierzu ist in einem ersten Schritt eine Beschreibung der relevanten Merkmale durchzuführen. Anschließend können diese operationalisiert werden. Die Operationalisierung beschreibt dabei die Suche nach Messgrößen (Ausprägungen), auf deren Basis innerhalb eines Merkmals eine Unterscheidung getroffen werden kann. Unter der Berücksichtigung der Anwendung von prädiktiver Datenanalyse ist ein einheitlicher Datentyp zur Beschreibung der technischen Änderungen anzustreben. Dabei kann mittels einer Beschreibung auf Basis von Merkmalen und deren Ausprägungen ein Datentyp gewählt werden, welcher große Freiheit bei der Auswahl und Gestaltung der Beschreibungsmerkmale zulässt, aber für die Anwendung von prädiktiver Datenanalyse mittels Random-Forest-Algorithmus geeignet ist. Zusammenfassend gilt es in diesem Arbeitsschritt die Teilforschungsfrage zu beantworten:

Wie können technische Produktänderungen für die Anwendung prädiktiver Datenanalyse beschrieben werden?

4.4.2 Differenzierbare Grundtypen technischer Änderungen

Das Ziel der Ableitung von differenzierbaren Grundtypen technischer Änderungen ist es, die Anzahl der Inputvariablen zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalysen zu reduzieren. Diese Reduktion folgt der Annahme, dass eine geringere Anzahl von Inputvariablen zu besseren Ergebnissen bei Prognosen führt.²⁹¹

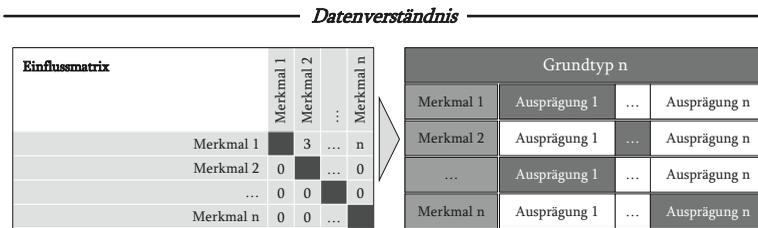


Abbildung 4-6: Konzept zur Ableitung differenzierbarer Grundtypen

Nach der Beschreibung von technischen Änderungen auf Basis von Merkmalen und Ausprägungen sind die Grundtypen technischer Änderungen zu definieren. Dabei gilt

²⁹⁰ Vgl. Eppinger et al. (2012), Design structure matrix methods and applications, S. 1ff.

²⁹¹ Vgl. Chollet et al. (2018), Deep Learning mit Python und Keras; Hall et al. (2016), The Evolution of Analytics

es aus der denkbaren Anzahl theoretischer Grundtypen diejenigen auszuwählen, welche zum einen eine Unterscheidung der technischen Änderungen hinsichtlich ihrer Aufwände erlauben, zum anderen aber auch in der Praxis nachweisbar sind.

Die Ableitung der Grundtypen soll dabei in Anlehnung an KOSOW ET AL.²⁹² erfolgen. Damit eine Reduktion der Merkmale stattfindet, sind die relevanten Merkmale zur Typenbildung zu identifizieren. Dazu werden die einzelnen Merkmale hinsichtlich ihrer Beiträge zur Typenbildung untersucht. Für diese Untersuchung ist es notwendig zu verstehen, welchen Einfluss die Merkmale aufeinander nehmen. Hierzu kann eine Einflussmatrix genutzt werden. Es gilt anschließend zwischen typenbildenden und typenbeschreibenden Merkmalen zu differenzieren. Zur Ableitung von Grundtypen müssen in einem nächsten Schritt Rohszenarien bestimmt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass die Szenarien konsistent sind. Mithilfe einer Konsistenzbewertung sowie einer Konsistenzanalyse ist dies zu prüfen. Anschließend gilt es konsistente und ähnliche Szenarien zusammenzufassen. Hierzu können Clusteralgorithmen genutzt werden. Dabei soll das Verfahren zur Ermittlung der Clusteranzahl nach BHOLOWALIA ET AL.²⁹³ genutzt werden. Die Informationen der Clusteranalyse werden anschließend zur Ableitung der Grundtypen genutzt. Zusammenfassend gilt es in diesem Arbeitsschritt die Teilforschungsfrage zu beantworten:

Wie lassen sich mittels typenbildender Merkmale Grundtypen technischer Produktänderungen ableiten?

4.4.3 Aufwands- und Nutzendimensionen von technischen Änderungen

Das Ziel der Ermittlung einer Aufwands- und Nutzendimension ist es, die Bewertungskriterien zur Auswahl von technischen Änderungen festzulegen. Dabei sollen die festzulegenden Aufwände die Zielvariablen der Vorhersage abbilden. Die Festlegung der Nutzenseite wiederum soll in Unterkapitel 5.3 dazu dienen, ein Vorgehen zur Ableitung einer Umsetzungsempfehlung auf Basis von Aufwand und Nutzen zu ermöglichen.

²⁹² Vgl. Kosow et al. (2008), Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse

²⁹³ Vgl. Bholowalia et al. (2014), EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means in WSN, S. 19

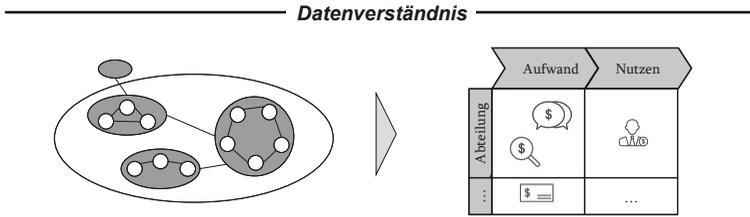


Abbildung 4-7: Konzept zur Festlegung der Aufwands- und Nutzendimensionen

Damit die Aufwände von technischen Änderungen prognostiziert werden können, ist eine Definition der Aufwände notwendig. Es ist festzulegen, unter welcher Voraussetzung der Aufwand einer Aktivität, welche in Verbindung zu dieser technischen Änderung steht, als Aufwand dieser technischen Änderung zugeordnet werden kann. Das Unternehmen und seine Umwelt können dabei mittels der Systemtheorie beschrieben werden. Damit wird das Unternehmen als System und das dazugehörige Änderungsmanagement als Subsystem verstanden und in unterschiedliche Bereiche zur Vorhersage der Aufwände unterteilt (Abbildung 4-7).²⁹⁴ Hierbei ist ein Bezug zwischen dem Aufwand, als Ausgangsvariable, und den Beschreibungsmerkmalen, als Inputvariablen, notwendig. Aufwände für ein Unternehmen, welche bspw. durch den Imageverlust bei einer großen Rückrufaktion entstehen, können durch einen Prognosealgorithmus nicht prognostiziert werden.

Auf der Gegenseite des Aufwands steht der Nutzen einer technischen Änderung. Damit eine Verrechnung von Aufwand und Nutzen möglich ist, müssen beide monetär bewertet werden. Hierzu soll zuerst untersucht werden, in welchen Bereichen ein Nutzen durch eine technische Änderung entsteht. Dabei soll generell zwischen zwei Alternativen unterschieden. Zum einen kann durch eine Nutzensteigerung des Produkts die Zahlungsbereitschaft der Kunden oder der Absatz eines Produktes erhöht werden.²⁹⁵ Zum anderen können durch Produkt- oder Prozessverbesserungen die Kosten zur Herstellung des Produkts reduziert werden.²⁹⁶ Diese Effekte können auch in

²⁹⁴ Vgl. Wilberg et al. (2015), Supporting the Implementation of Engineering Change Management with the Viable System Model, S. 733

²⁹⁵ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 76; Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 109; Chang et al. (2011), Reasons and costs for design change during production, S. 276

²⁹⁶ Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 76; Balakrishnan et al. (1996), Managing Engineering Change: Market Opportunities and Manufacturing Costs, S. 335ff.; Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 109; Ullah et al. (2016), Engineering Product and Process Design Changes: A Literature Overview, S. 28

Kombination auftreten und sind gegen die Umsetzungsaufwände einer technischen Änderung abzuwägen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass innerhalb des Methodikschritts die folgende Teilforschungsfrage beantwortet werden soll:

Wie können Aufwand und Nutzen technischer Produktänderungen zur Minimierung der Gesamtänderungsaufwände beschrieben werden?

4.4.4 Aufwandsabschätzung für technische Änderungen mittels Random Forest und Minimierung des Gesamtänderungsaufwands

Nach der Beschreibung der notwendigen Daten für die prädiktive Datenanalyse ist nachfolgend ein Prädiktionsmodell zu entwickeln. Dieses Modell dient der Aufwandsabschätzung technischer Änderungen und bildet den Kern der Methodik in der vorliegenden Arbeit. Hierzu gilt es in einem ersten Schritt die Anforderung an dieses Verfahren aufzunehmen und zu beschreiben. Die Eignung des Random-Forest-Algorithmus als zu nutzendes Verfahren ist dabei zu zeigen. Für den Aufbau und das Trainieren des Random-Forest-Algorithmus sind verschiedene Teilschritte notwendig. Darauf aufbauend müssen die Evaluierung des Modells sowie eine zugehörige Hyperparameteroptimierung zur Verbesserung der Prädiktionsgüte erfolgen. Hierdurch kann sichergestellt werden, dass ein nutzbares Verfahren mit der notwendigen Prädiktionsgüte ausgewählt wurde. Anschließend soll der Algorithmus angewendet werden. Zuletzt ist die Methode zur Bündelung der technischen Änderungen zum Zweck der Minimierung des Gesamtänderungsaufwands zu entwickeln.

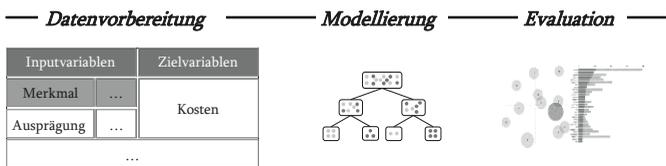


Abbildung 4-8: Modell zur Aufwandsbewertung technischer Änderungen

Die notwendige Datenbasis zum Aufbau des Prädiktionsmodells setzt sich aus den zuvor erarbeiteten Teilmodellen zusammen. Als Inputvariablen sollen die in Unterkapitel 5.1 und 5.2 entwickelten Modelle verwendet werden. Die Zielvariable wird durch den in Unterkapitel 5.3 definierten Aufwand einer technischen Änderung beschrieben. In einem ersten Schritt soll die Datenbasis zum Trainieren des Algorithmus aufgebaut werden. Weiterhin sollen die Modellparameter entwickelt werden. Diese ha-

ben einen Einfluss auf die Prädiktionsgüte, welche mittels der Datenbasis und des Modells evaluiert werden kann. Die Modellgüte soll dabei durch eine Hyperparameteroptimierung verbessert werden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass innerhalb des vierten Methodikschritts die folgende Teilforschungsfrage beantwortet werden soll:

Wie können die Zusammenhänge zwischen Beschreibung und Grundtypen technischer Produktänderungen und deren Aufwand ermittelt werden?

4.4.5 Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen

Das Ziel des fünften Methodikschritts ist es, ein Entscheidungsmodell zu entwickeln, welches basierend auf dem zu erwartenden Aufwand und Nutzen einer technischen Änderung sowie der Aufwandsminimierung durch Bündelung technischer Änderungen eine Umsetzungsempfehlung gibt.

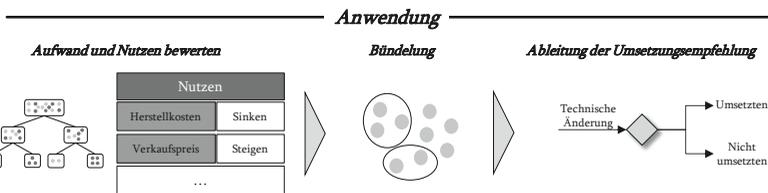


Abbildung 4-9: Konzept zur Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen

Zur Ableitung der Umsetzungsempfehlung muss zu Beginn die zu bewertende technische Änderung in das Beschreibungsmodell eingeordnet werden. Anschließend kann der Grundtyp der technischen Änderung bestimmt werden. Die technische Änderung kann sodann mit dem mittels Vergangenheitsdaten trainierten Modell angewendet werden, um die Aufwände der technischen Änderungen abzuschätzen. Der Nutzen der technischen Änderung kann wiederum durch Expertenworkshops bestimmt werden. Anschließend kann bei mehreren technischen Änderungen eine Bündelung zur Aufwandsminimierung erfolgen. Anschließend gilt es die Wirtschaftlichkeit der technischen Änderungen und Änderungsbündel zu bewerten und eine Umsetzungsempfehlung abzuleiten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass innerhalb des Methodikschritts die folgende Teilforschungsfrage beantwortet werden soll:

Wie kann mittels einer Aufwands- und Nutzenvorhersage eine änderungsaufwandsminimale Umsetzungsempfehlung für technische Produktänderungen abgeleitet werden?

Nachdem das Grobkonzept der Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse vorgestellt wurde, erfolgt die Ableitung der Teilmodelle der Methodik.

4.5 Ableitung von Teilmodellen

Nachdem in Unterkapitel 4.4 das Grobkonzept der Methodik vorgestellt wurde, erfolgt nun die Ableitung der Teilmodelle, welche zur Erreichung der Zielsetzung des Forschungsvorhabens notwendig sind. Modelle vereinfachen gezielt die Realität und lassen sich entsprechend ihrem Zweck anhand des Abbildungsmerkmals, des Verkürzungsmerkmals und des pragmatischen Merkmals unterscheiden.²⁹⁷

Das Abbildungsmerkmal beschreibt, dass ein Modell stets als Repräsentation eines natürlichen oder künstlichen Originals angesehen wird. Dabei kommen natürliche und maschinelle Informationsverarbeitungen zum Einsatz. Das Verkürzungsmerkmal beschreibt die fehlende Vollständigkeit der Repräsentation eines Originals. Damit ist gemeint, dass nicht alle Attribute in einem Modell dargestellt werden, sondern nur solche, welche in den Augen des Modellentwicklers für den vorliegenden Anwendungsfall als relevant erscheinen. Das pragmatische Merkmal beschreibt die Ersetzungsfunktion von Modellen. Dabei beschreiben Modelle nicht nur etwas, sondern tun dies für jemanden. Dies geschieht innerhalb einer bestimmten Zeit und zu einem bestimmten Zweck. Dabei können neben der Frage, wovon etwas ein Modell ist, auch die Fragen, für wen, wann und wozu ein Modell vorhanden ist, gestellt werden.²⁹⁸

Im Folgenden werden die zur Erreichung der Zielsetzung notwendigen Teilmodelle vorgestellt (siehe Abbildung 4-10). Das erste Teilmodell ist ein Beschreibungsmodell mit dem Ziel, technische Änderungen für die Verwendung von prädiktiver Datenanalyse zu beschreiben. Aufbauend auf diesem Teilmodell kann im zweiten Teilmodell ebenfalls ein Beschreibungsmodell abgeleitet werden. Hier werden die Grundtypen technischer Änderungen mittels typenbildender Merkmale entwickelt. Als drittes Teilmodell und letztes Beschreibungsmodell erfolgt die Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen. Im nachfolgenden Teilmodell 4 wird ein Erklärungsmodell erarbeitet. Dieses soll die Zusammenhänge zwischen der Beschreibung

²⁹⁷ Vgl. Stachowiak (1973), Allgemeine Modelltheorie, S. 131ff.

²⁹⁸ Vgl. Stachowiak (1973), Allgemeine Modelltheorie, S. 131ff.

von technischen Änderungen (Teilmodelle 1 und 2) und den Aufwänden einer technischen Änderung (Teilmodell 3) erklären. Die Ergebnisse der beschriebenen Modelle werden anschließend in Teilmodell 5, ein Entscheidungsmodell, übernommen. Hierbei erfolgt die Anwendung der ermittelten Teilmodelle zur Minimierung des Gesamtänderungsaufwands.

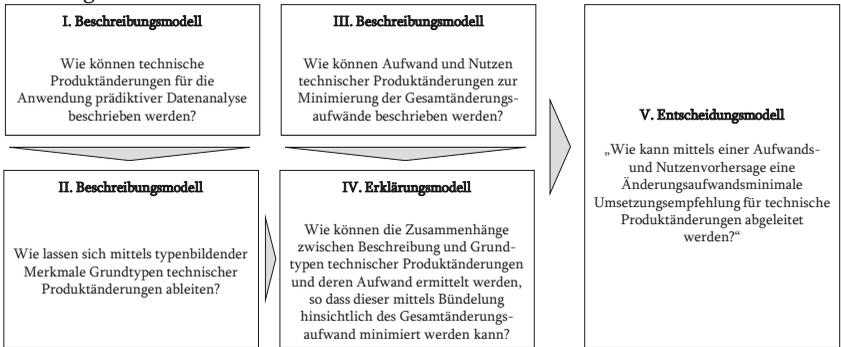


Abbildung 4-10: Teilmodelle zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse

Ausgehend von der Hauptforschungsfrage und den abgeleiteten Teilforschungsfragen sind die fünf vorgestellten Teilmodelle entwickelt worden. Die Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse setzt sich aus diesen Teilmodellen zusammen. Die Detaillierung der Methodik erfolgt in Kapitel 5 basierend auf diesen Teilmodellen.

4.6 Zwischenfazit: Grobkonzept zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen

Innerhalb des vierten Kapitels wurde das Grobkonzept für die Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse vorgestellt. In Unterkapitel 4.1 wurde zu Beginn das Zielbild der Methodik vorgestellt, in Unterkapitel 4.2 wurden die Anforderungen an die Methodik beschrieben. Dabei unterscheiden sich die inhaltlichen von den formalen Anforderungen. Die inhaltlichen Anforderungen ergeben sich aus dem Objektbereich, dem Zielbereich und der Lösungshypothese der Arbeit. Formale Anforderungen sichern die Anwendbarkeit und Richtigkeit der Methodik ab. In Unterkapitel 4.3 ist der Nutzen der Methodik dargestellt. Dieser lässt sich

als Minimierung des Gesamtänderungsaufwands, basierend auf prädiktiver Datenanalyse und Grundtypen technischer Änderungen, zusammenfassen. Um Ziel und Nutzen der Methodik realisieren zu können, ist zunächst das Grobkonzept der Methodik in Unterkapitel 4.4 vorgestellt worden. Die daraus resultierenden notwendigen Teilmodelle wurden in Unterkapitel 4.5 abgeleitet. Im Kapitel 5 werden die Teilmodelle im Detail vorgestellt.

5 Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse

Basierend auf dem in Kapitel 4 beschriebenen Grobkonzept erfolgt in Kapitel 5 die Detaillierung der Methodik zur Änderungsbewertung mittels prädiktiver Datenanalyse. Hierzu werden die bereits vorgestellten fünf Teilmodelle entwickelt. Innerhalb des ersten Teilmodells (vgl. Unterkapitel 5.1) erfolgt die Beschreibung technischer Änderungen auf Basis von Merkmalen und Ausprägungen. Diese werden anschließend als Eingangsdaten für das zweite Teilmodell (vgl. Unterkapitel 5.2) genutzt. Hier werden Grundtypen technischer Änderungen definiert. Es folgt die Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen innerhalb des dritten Teilmodells (vgl. Unterkapitel 5.3). Die erarbeiteten Inhalte der Teilmodelle 2 und 3 werden wiederum als Input für das vierte Teilmodell (vgl. Unterkapitel 5.4) genutzt. Innerhalb des vierten Teilmodells werden die Zusammenhänge zwischen Grundtypen technischer Änderungen und deren Aufwand mithilfe eines Algorithmus des Maschinellen Lernens hergestellt. Anschließend erfolgt im letzten Teilmodell (vgl. Unterkapitel 5.5) die Ableitung von Umsetzungsempfehlungen zur Minimierung der Gesamtänderungsaufwände. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit zur Detaillierung der Methodik ab (vgl. Unterkapitel 5.6).

5.1 Beschreibung von technischen Änderungen

Innerhalb des ersten Teilmodells erfolgt die Beschreibung von technischen Änderungen. Diese Beschreibung erfolgt unter der Berücksichtigung, dass die Beschreibungselemente anschließend für die Datenanalyse genutzt werden. Dabei kann die Ermittlung eines Beschreibungsmodells als Komplexitätsreduktion für die Datenanalyse beschrieben werden. Das Ziel ist es, das Vorwissen hinsichtlich der verschiedenen Unterscheidungsmerkmale technischer Änderungen miteinfließen zu lassen. Dazu müssen bestehende Ansätze zur Beschreibung technischer Änderungen untersucht werden. Die Forschungsfrage für das Teilmodell lautete dementsprechend:

Wie können technische Produktänderungen für die Anwendung prädiktiver Datenanalyse beschrieben werden?

Phase des CRISP-DM-Modells	Vorgehen im ersten Methodikschritt
Datenverständnis	5.1.1 Literaturanalyse von Beschreibungsmerkmalen
	5.1.2 Operationalisierung der Merkmale
	5.1.3 Zusammenfassung der Merkmale und Ausprägungen

Abbildung 5-1: Übersicht des ersten Teilmodells

Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden die folgenden Arbeitsschritte durchlaufen: Zu Beginn werden Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen ermittelt. Dies erfolgt auf Basis einer systematischen Literaturanalyse. Die in der Literatur identifizierten Merkmale werden konsolidiert. Anschließend werden die relevanten Merkmale hinsichtlich des Aufwands und Nutzens von technischen Änderungen abgeleitet. Nach diesem ersten Arbeitsschritt werden die relevanten Beschreibungsmerkmale operationalisiert. Bei der Operationalisierung werden zunächst Indikatoren zur Beschreibung der Merkmale festgelegt. Darauffolgend werden diskrete Merkmalsausprägungen für diese Indikatoren festgelegt, welche die Beschreibung von technischen Änderungen innerhalb eines Merkmals ermöglichen.

5.1.1 Ermittlung der Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen

Die Ermittlung der Beschreibungsmerkmale beginnt mit einer systematischen Literaturanalyse. Mithilfe von systematischen Literaturanalysen wird das Ziel verfolgt, Subjektivität durch die Gesamtheit der Werke und die damit einhergehenden Sichtweisen zu reduzieren und eine möglichst gesamtheitliche Betrachtung des Untersuchungsgegenstands zu erzielen.²⁹⁹ Dabei weist eine Literaturanalyse die folgenden Kerneigenschaften auf: ein klares Ziel der Untersuchung, eine systematische Suche nach relevanten Werken, um möglichst viel Literatur des Untersuchungsbereichs zu identifizieren, und die Bewertung der gefundenen Literatur bezüglich der Eignung für die Untersuchung.³⁰⁰

Als Ziel der Literaturanalyse sollen Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen für die anschließende Datenanalyse identifiziert werden. Hierzu müssen zu Beginn die relevanten Suchbegriffe und ein Suchfeld bestimmt werden. Suchbegriffe können dabei mittels eines Suchwortdiagramms festgelegt werden. Hierbei werden ausgehend

²⁹⁹ Vgl. Becker et al. (2018), Systematische Literaturanalyse, S. 75f.; Stamm et al. (1995), Metaanalyse, S. 6

³⁰⁰ Vgl. Fink et al. (2014), Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in Produktions- und Dienstleistungsnetzwerken, S. 3f.

von einem Suchbegriff zugehörige Synonyme gesucht.³⁰¹ Durch eine Verknüpfung der unterschiedlichen Suchbegriffe untereinander ergeben sich verschiedene Wortkombinationen. In der vorliegenden Arbeit ist ausgehend von den Suchbegriffen „Beschreibung“ und „Technische Änderung“ ein Suchwortdiagramm erstellt worden. Darin sind insgesamt 61 Suchbegriffskombinationen in deutscher und 43 Suchbegriffskombinationen in englischer Sprache vorhanden (siehe Anhang A1).

Nachdem die Auswahl der Suchbegriffe festgelegt wurde, ist das Suchfeld zu bestimmen. Hierbei handelt es sich zum einen um die Datenbanken, welche untersucht werden sollen, zum anderen um die Sprachen sowie den relevanten Zeitraum. Für diese Arbeit werden die deutschen Suchanfragen in *Google Scholar* und *SpringerLink* verwendet. Hier sind sowohl deutsche als auch englische Publikationen zu finden. Für die englischen Suchanfragen werden neben den beiden bereits genannten Datenbanken zusätzlich *Scopus* und *WebOfScience* geprüft. In diesen beiden Datenbanken ist eine Suche auf Deutsch nicht sinnvoll, da hier Publikationen lediglich in englischer Sprache vorliegen. *Google Scholar* wurde ausgewählt, weil es sich dabei um die weltweit größte Datenbank von Literatur handelt, die aktuell auf 389 Millionen Einträge geschätzt wird.³⁰² *SpringerLink* ist der weltweit zweitgrößte Verlag für wissenschaftliche Literatur und besitzt nach eigenen Angaben einen Umfang von knapp 13 Millionen Einträgen. *Scopus* und *WebOfScience* sind jeweils Onlinesammlungen von wissenschaftlichen Artikeln mit 72 bzw. 67 Millionen Einträgen.³⁰³

Neben der Sprache wird das Erscheinungsjahr als zusätzlicher Suchfilter gesetzt. Die Suche wird dabei auf Werke ab 2012 eingeschränkt. Der Grund ist, dass HAMRAZ ET AL. in ihrer Literaturanalyse aus dem Jahr 2013 bereits eine systematische Suche zur Literatur bezüglich technischer Änderungen durchgeführt haben, welche Dokumente bis zum Jahr 2011 beinhaltet. Die Ergebnisse von HAMRAZ ET AL. ergänzen die in dieser Arbeit durchgeführte Literaturanalyse.

Nach der Festlegung von Suchworten und Suchfeld wird im Folgenden auf die durchzuführenden Reduktionsschritte der gefundenen Ergebnisse eingegangen. Außerdem erfolgt eine Auswertung der Suchergebnisse.

³⁰¹ Vgl. Fink et al. (2014), Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in Produktions- und Dienstleistungsnetzwerken, S. 3; Easterby-Smith et al. (2012), *Management research*, S. 112

³⁰² Vgl. Gusenbauer (2018), *Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases*, S. 192f.

³⁰³ Vgl. Gusenbauer (2018), *Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases*, S. 192f.

Durchführung der Literaturanalyse zur Identifikation der Beschreibungsmerkmale

Die Literaturanalyse wird nach dem Vorbild von BORREGO ET AL.³⁰⁴ durchgeführt, welche ein systematisches Vorgehen zur Analyse von Literatur im Kontext von Ingenieurwissenschaften und interdisziplinären Feldern beschreiben. Dabei sind unterschiedliche Schritte von der initial sich ergebenden Literatur bis zur finalen Auswahl der zu inkludierenden Werke durchzuführen (vgl. Abbildung 5-2).

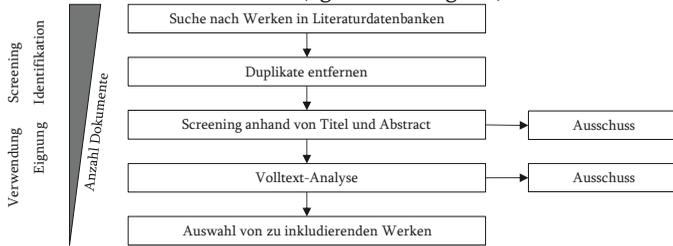


Abbildung 5-2: Vorgehen bei der Literaturanalyse

Auf Basis der Suchanfragen in den Datenbanken konnten insgesamt 363.108 Suchtreffer identifiziert werden, welche nach der Relevanz der Treffer geordnet waren. Für die Literaturanalyse sind aufgrund von Einschränkungen beim Suchtrefferexport nicht alle Suchtreffer betrachtet worden. Vor allem *Google Scholar* bietet keine Funktion an, um alle Suchtreffer zu exportieren. Daher muss eine auswertbare Menge an Suchtreffern ausgewählt werden. Für jeden Suchbegriff wurden die 100 relevantesten Treffer exportiert. Die Relevanz wird dabei vom Suchalgorithmus der Internetseite bestimmt. Insgesamt wurden zu 39.807 Suchtreffern die Titel, Autoren, Veröffentlichungsjahre usw. exportiert. Beim Übertrag der Suchtreffer in eine eigene Datenbank sind in einem ersten Schritt die Duplikate zu entfernen. Im nächsten Schritt gilt es irrelevante Einträge zu eliminieren. Hierzu können Stoppwörter genutzt werden. Diese beschreiben zuvor ausgewählte Begriffe aus Biologie, Politik, Medizin, Recht, Finanzen und Ähnlichem, welche auf Literatur aus anderen Wissenschaftszweigen schließen lassen. Das Ziel ist es, fachfremde Werke, die sich unter den Suchtreffern befinden, auszusortieren. Anhand der Titel und einer Liste von 11.467 Stoppwörtern wurde eine automatische Filterung durchgeführt. Nach Anwendung dieses Filters verblieben 6.494 Einträge. Diese Menge kann manuell untersucht werden. Hierbei wird geprüft, ob der Titel zum Zielbereich der Literaturanalyse passt. Während die Suchtreffer in den jeweiligen Datenbanken bisher getrennt voneinander betrachtet wurden,

³⁰⁴ Vgl. Borrego et al. (2014), Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields

erfolgte nun die Kombination aller Datenbanken und mit den 427 Werken, die HAMRAZ ET AL. in ihrer Literaturanalyse betrachtet haben. Für die jetzt 799 vorliegenden Werke wurde auf Basis des Abstracts entschieden, ob sie relevant sind. Dies traf auf 501 Werke zu, die im letzten Schritt vollständig betrachtet wurden. Aus den relevanten Textpassagen, die Informationen über die Eigenschaften von technischen Änderungen enthalten, wurden die entsprechenden Informationen extrahiert. Auf diese Weise blieben schließlich von den 363.108 Suchtreffern 194 Textabschnitte übrig.

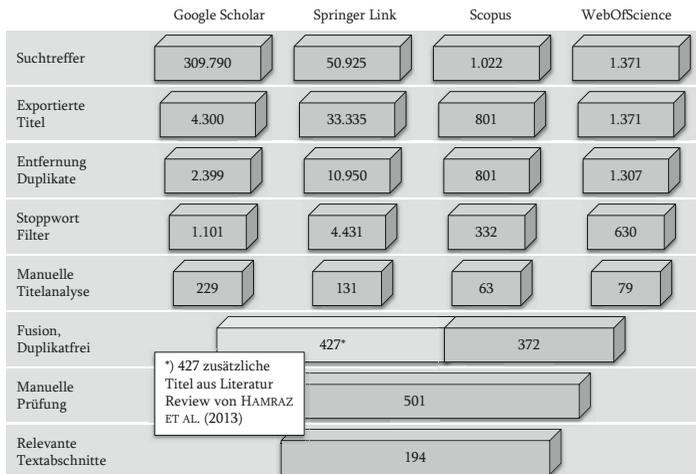


Abbildung 5-3: Ergebnisse der durchgeführten Literaturanalyse

Auf Basis der identifizierten Literatur wurde anschließend eine Liste mit Merkmalen zur Beschreibung von technischen Änderungen erstellt. Diese Liste umfasst 169 potenzielle Merkmale zur Beschreibung von technischen Änderungen und bildet den Ausgangspunkt der nachfolgenden Konsolidierung der Beschreibungsmerkmale.³⁰⁵

³⁰⁵ Vgl. Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst; Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen; Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung; Chen et al. (2002), Distributed engineering change management for allied concurrent engineering; Aurich et al. (2007), Engineering Change Impact Analysis in Production Using VR; Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse; Vgl. Pirta (2015), Using enterprise architecture to guide application change management; Sampietro (2016), Team members and change requests; Wickel et al. (2015), Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes

Zusammenfassung der Beschreibungsmerkmale

Nachdem in diesem Teilkapitel bereits die potenziellen Merkmale zur Beschreibung von technischen Änderungen vorgestellt wurden, erfolgt anschließend die Konsolidierung der Merkmale. Hierzu werden in einem ersten Schritt die Duplikate aus der Liste der Merkmale entfernt. Anschließend können ähnliche Merkmale zusammengefasst und nicht relevante Merkmale für den Objektbereich eliminiert werden. Somit entsteht eine konsolidierte Liste von Merkmalen. Das Ziel ist es, dass diese konsolidierten Merkmale einen Mindestgrad an Heterogenität untereinander aufweisen. Diese Anforderung ergibt sich aus der Tatsache, dass die später anzuwendenden Algorithmen besser mit Daten ohne Redundanzen umgehen können. Im Folgenden (siehe Tabelle 5-1) werden die verbleibenden Merkmale in alphabetischer Reihenfolge beschrieben.

Tabelle 5-1: Potenzielle Merkmale zur Beschreibung technischer Änderungen

Merkmale	Beschreibung
Änderungsvolumen	Dieses Merkmal beschreibt, welches Volumen des Änderungsobjektes von der Änderung betroffen ist. Besonders relevant ist dies bei Problemen in der Produktion, wenn nicht alle Teile betroffen sind, sondern nur gewisse Chargen oder Einzelteile.
Änderungsvorschlag	Dieses Merkmal beschreibt, dass eine Änderung vorgeschlagen wird. Dabei werden die Art und das Ziel der vorgeschlagenen Änderung beschrieben.
Architektur	Die Architektur eines Produktes beschreibt, wie die funktionalen Elemente eines Produkts arrangiert sind. Weiterhin wird beschrieben wie die funktionalen Elemente von physischen Komponenten realisiert werden und die Schnittstellen von physischen Komponenten ausgestaltet sind.
Benötigte Kapazitäten	Dieses Merkmal beschreibt die notwendigen Kapazitäten, welche zur Durchführung einer Änderung notwendig sind.
Betroffene Marktausdehnung	Wird das zu ändernde Produkt nur auf dem regionalen oder nationalen Markt angeboten, sind in der Regel weniger Vorschriften und Normen zu beachten, als bei einem internationalen Vertrieb des Produkts.
Betroffene Objektspezifikation	Die betroffene Objektspezifikation gibt an, welcher Aspekt des zu ändernden Objekts von einer technischen Änderung betroffen ist.
Betroffene Stakeholder	Als betroffene Stakeholder werden Abteilungen innerhalb des Unternehmens oder externe Stakeholder beschrieben, die in die Bearbeitung der Änderung einbezogen werden.
Betroffenes Änderungsobjekt	Das betroffene Objekt beschreibt, woher eine technische Änderung stammt.
Beziehung zu anderen Änderungen	Die Beziehung zu anderen Änderungen beschreibt, dass eine technische Änderung eventuell als Folge einer vorherigen Änderung entstanden ist oder seinerseits neue Änderungen auslöst.
Dringlichkeit der Änderung	Je nach Schadensmaß und Art der Änderung können sich technische Änderungsanfragen hinsichtlich der Dringlichkeit unterscheiden.
Grund der Änderung	Der Grund der Änderung beschreibt die Art der Abweichung des Ist- vom Soll-Zustand und ist eng verbunden mit der Ursache der Änderung.
Initiator der Änderung	Beschreibt die Abteilung oder Person eines Unternehmens, welche die Änderung initiiert.
Komplexität	Die Komplexität kann auf Basis verschiedener Dimensionen beschrieben werden, wie beispielsweise die Zahl der Komponenten, die Abhängigkeiten zwischen den Komponenten, die Anzahl der Elemente und die Anzahl der Ebenen der Stückliste, der Entwicklungskosten, der Größe der Entwicklungsabteilungen oder der Wahrscheinlichkeit für eine Änderungsfortpflanzung.
Notwendigkeit der Änderung	Die Notwendigkeit der Änderung wird in der Literatur am häufigsten genannt. Sie differenziert zwischen zwingend notwendigen Änderungen und Änderungen, die durchgeführt werden können, jedoch nicht müssen.
Phase des Lebenszyklus	Dieses Merkmal beschreibt die Phase des Lebenszyklus, in welchem sich das geänderte Produkt befindet. In diesem Zusammenhang wird häufig von der „Rule of Ten“ gesprochen, welche von einem exponentiellen Anstieg der Kosten um den Faktor zehn mit jeder Phase des Lebenszyklus ausgeht.
Problemteil	Bekannte Bauteile oder Baugruppen, bei denen wiederholt Probleme aufgetreten sind oder bereits mehrfach Änderungen durchgeführt wurden.
Risiko der Fortpflanzung	Das Merkmal beschreibt, ob durch die Änderung an der betrachteten Komponente weitere Änderungen zu erwarten sind. Dieses ist auch unter dem Namen Änderungspropagation bekannt.
Sicherheitsrelevanz	Beschreibt, ob die Sicherheit des Änderungsobjekts durch die technische Änderung betroffen ist.
Umfang der Änderung	Der Umfang der Änderung beschreibt, ob weitere Objekte von der primären Änderung betroffen sind. Das Merkmal beschreibt somit die sekundären Änderungen, welche mit der primären Änderung mitzuändern sind.
Ursache der Änderung	Die Ursache der Änderung sagt aus, warum die Abweichung des Ist- vom Soll-Zustand entstanden ist. Sie ist eng verbunden mit dem Grund der Änderung, ein Beispiel wurde unter dem Punkt „Grund der Änderung“ bereits vorgestellt.
Zeitliche Gültigkeit	Die Zeitliche Gültigkeit von Änderungen gibt an, wann eine technische Änderung durchzuführen ist.
Zulassungsrelevanz	Beschreibt die Notwendigkeit einer neuen Beantragung der Zulassung für ein Produkt.

Auf Basis der Beschreibung der Merkmale können die Merkmale anschließend hinsichtlich ihrer Abhängigkeit voneinander geprüft werden. Dabei ist es das Ziel, eine Reduktion der Merkmale mittels Konsolidierung zu erreichen. Hierdurch kann die spätere Anwendung vereinfacht werden. Eine Vereinfachung bedeutet dabei, mit einer möglichst geringen Anzahl an Beschreibungsmerkmalen eine möglichst breite

und differenzierbare Menge an Änderungen beschreiben zu können. Hierzu wird eine Design Structure Matrix (DSM) nach BROWNING verwendet, so dass Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen identifiziert und anschließend in Clustern zusammengefasst und weiter reduziert werden können.³⁰⁶ Es darf davon ausgegangen werden, dass die Abhängigkeiten von Merkmalen untereinander über die Zeit stabil sind. Daher eignet sich die Anwendung einer statischen DSM. Die Abhängigkeit zwischen zwei Merkmalen wird hierbei in ungerichteter Form angegeben, da dies für die Identifikation von Clustern ausreichend ist. Die in der Grafik gezeigten Abhängigkeiten wurden durch Expertengespräche bestätigt. Auf eine detaillierte Erläuterung der Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen wird an dieser Stelle verzichtet.

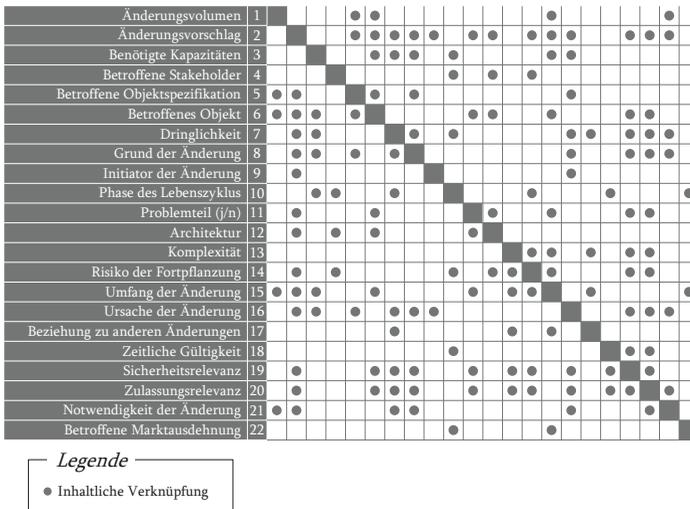


Abbildung 5-4: Design Structure Matrix mit Merkmalsabhängigkeiten

Auf Basis der DSM und der darin eingetragenen Abhängigkeiten zwischen den Merkmalen erfolgt die Clusterung. Dies geschieht mittels des Idicula-Gutierrez-Thebeau-Algorithmus. Im Zuge der Arbeit erfolgt nur die Anwendung dieses Algorithmus, für eine detaillierte Funktionsweise wird auf die Literatur verwiesen³⁰⁷. Durch die Anwendung des Algorithmus entstehen unterschiedliche Ähnlichkeitscluster, innerhalb

³⁰⁶ Vgl. Eppinger et al. (2012), Design structure matrix methods and applications, S. 2ff.

³⁰⁷ Vgl. Eppinger et al. (2012), Design structure matrix methods and applications, S. 25; Borjesson et al. (2014), A module generation algorithm for product architecture based on component interactions and strategic drivers, S. 37

derer anschließend eine detaillierte Analyse der Zusammenhänge erfolgen muss. Aus dieser Analyse gilt es differenzierbare Merkmale zur Beschreibung technischer Änderungen abzuleiten.

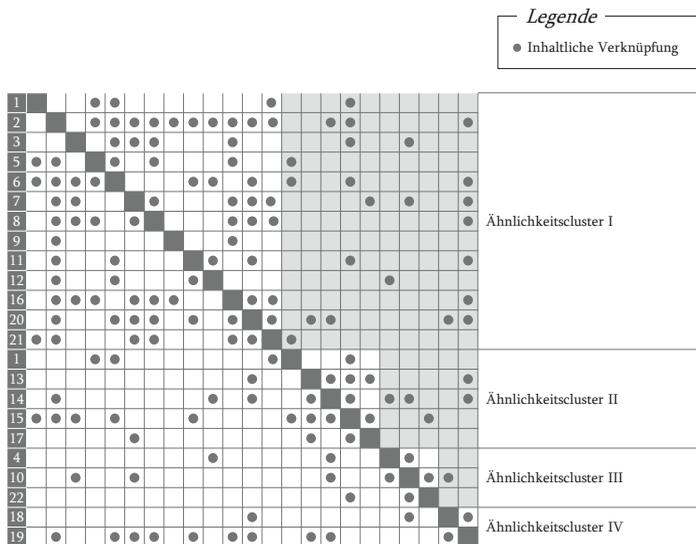


Abbildung 5-5: Geordnete Design Structure Matrix

Im Folgenden werden die durch den Algorithmus identifizierten Cluster kurz vorgestellt und erläutert. Weiterhin werden die als relevant identifizierten Merkmale innerhalb der Cluster benannt.

Mithilfe des Idicula-Gutierrez-Thebeau-Algorithmus konnten insgesamt vier Cluster identifiziert werden. Der Cluster mit den meisten Merkmalen kann als Cluster der Änderungsanforderungen zusammengefasst werden. Innerhalb dieses Clusters befinden sich maßgeblich Merkmale, welche auf die Ursache des Problems referenzieren. Der zweite Cluster kann als Änderungskomplexität beschrieben werden. Darin befinden sich maßgeblich Merkmale, welche sich auf die Komplexität der Durchführung einer

Änderung beziehen. Der dritte Cluster beschreibt die Änderungsausdehnung. Die darin enthaltenen Merkmale haben eine Beziehung zur Anzahl betroffener Personen und Objekte einer technischen Änderung. Der letzte Cluster kann als Cluster des Schadensausmaßes zusammengefasst werden. Die zwei innerhalb des Clusters enthaltenen Merkmale haben dabei eine Beziehung zum möglichen Schaden, welcher sich aus den Änderungen oder deren Nichtumsetzung ergeben kann.

Nachdem innerhalb dieses Teilkapitels Ähnlichkeitscluster mittels einer DSM ermittelt wurden, folgt im nächsten Teilkapitel die Operationalisierung der Änderungsmerkmale, um eine Unterscheidung der technischen Änderungen innerhalb dieser Merkmale zu ermöglichen.

5.1.2 Operationalisierung der Beschreibungsmerkmale technischer Änderungen

Ziel dieses Teilkapitels ist es, für die in Teilkapitel 5.1.1 zusammengefassten Merkmale zur Beschreibung technischer Änderungen eine Operationalisierung durchzuführen. Diese Operationalisierung ist zum einen notwendig, um technische Änderungen innerhalb ihrer Merkmale unterscheiden zu können. Zum anderen ermöglicht eine Operationalisierung die Ableitung von Typologisierungskriterien, was im nächsten Teilkapitel erfolgt. Dabei wird der durch die denkbaren Kombinationen von Ausprägungen aufgespannte Raum technischer Änderungen durch in sich homogene und zueinander heterogene Typen unterschieden. Für eine Operationalisierung müssen sogenannte „Messgrößen“ gefunden werden, mittels derer unterschiedliche Ausprägungen eines Merkmals darzustellen sind. Dabei gilt die Voraussetzung, dass mindestens zwei Ausprägungen zur Unterscheidung eines Merkmals existieren³⁰⁸. Weiterhin muss ein Merkmal durch eine endliche Anzahl von Ausprägungen beschreibbar sein³⁰⁹. Dadurch ist es notwendig, dass kontinuierliche Skalen anschließend in unterschiedliche Klassen eingeteilt werden, da sich ansonsten eine unendliche Anzahl an Ausprägungen und damit auch Typen technischer Änderungen ergeben würde. Die Darstellung der Merkmale und ihrer Ausprägungen erfolgt anschließend in Form eines morphologischen Kastens. Dieser dient der Darstellung aller relevanten Informationen auf einen Blick³¹⁰. Nachfolgend werden die Ähnlichkeitscluster vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Merkmale zur Unterscheidung von technischen Änderungen ausgewählt, welche

³⁰⁸ Vgl. Gladen (2001), Kennzahlen- und Berichtssysteme, S. 36

³⁰⁹ Vgl. Müller-Benedict (2007), Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften, S. 34

³¹⁰ Vgl. Ehrlenspiel et al. (2014), Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, S. 73f.; Zwicky (1989), Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild, S. 114ff.; Schomburg (1980), Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau, S. 88

zu einer hohen Differenzierung in Form von zu erwartenden Änderungskosten beitragen. Diese Merkmale gilt es anschließend zu operationalisieren.

Ähnlichkeitscluster I: Änderungsanforderungen

Der erste Ähnlichkeitscluster umfasst die Merkmale *Änderungsvolumen*, *Änderungsvorschlag*, *Architektur*, *benötigte Kapazitäten*, *Objektspezifikation*, *Objekt*, *Dringlichkeit*, *Grund der Änderung*, *Initiator der Änderung*, *Notwendigkeit der Änderung*, *Problemtteil*, *Ursache der Änderung* und *Zulassungsrelevanz*. Diese Merkmale weisen maßgeblich auf die Anforderungen der technischen Änderungen hin.

Das Merkmal *Änderungsvolumen* beschreibt, welches Volumen des Änderungsobjekts von einer Änderung betroffen ist. Als Volumen ist die relevante Stückzahl zu verstehen. Besonders bedeutsam ist dies bei Problemen in der Produktion, wenn nicht alle Teile betroffen sind, sondern nur gewisse Chargen oder Einzelteile. In anderen Bereichen, zum Beispiel bei Zeichnungsänderungen, ist das *Änderungsvolumen* nicht relevant. KAISER³¹¹ und AßMANN³¹² beschreiben in ihren Arbeiten das *Änderungsvolumen* als relevantes Merkmal zur Beschreibung technischer Änderungen. Als Messgröße für dieses Merkmal werden hier das Produktspektrum, die Serie oder das Einzelprodukt angewendet. In Anlehnung daran und an die im Zuge der Literaturanalyse untersuchten Werke wird das Merkmal mit den Ausprägungen Produktportfolio, Produktserie, Produktcharge und Einzelposition operationalisiert. Das Produktportfolio beschreibt dabei, dass alle zugehörigen Produkte des Portfolios von der Änderung betroffen sind. Die Produktserie beschreibt wiederum einen Teilausschnitt des Produktportfolios. Eine Produktcharge bedeutet, dass nur die während eines Arbeitsschritts mit denselben Rohstoffen produzierten Produkte betroffen sind. Die Einzelposition wiederum beschreibt bspw. einzelne Betriebsmittel oder ein spezifisches Werkzeug, das zur Herstellung verwendet wurde.

Das Merkmal *Architektur* beschreibt den Aufbau eines Produkts. Die *Architektur* stellt dar, wie die funktionalen Elemente eines Produkts arrangiert sind, wie die funktionalen Elemente von physischen Komponenten realisiert werden und wo sich die Schnittstellen von physischen Komponenten befinden.³¹³ Mit der *Architektur* geht die Austauschbarkeit von Modulen und Komponenten einher. Durch die klare Definition von Komponenten und Schnittstellen sind Änderungen, die einzelne Komponenten betreffen, isoliert durchzuführen. Dies führt zu einem geringeren Risiko der Änderungsfortpflanzung und hat somit direkte Auswirkungen auf den Änderungsaufwand. JARRATT

³¹¹ Vgl. Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst

³¹² Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung

³¹³ Vgl. Ulrich (1995), The role of product architecture in the manufacturing firm

ET AL.³¹⁴ beschreiben in ihrer Arbeit die Bedeutung der Produktarchitektur für die resultierenden Aufwände bei der Durchführung technischer Änderungen. Dabei werden in Anlehnung an LINDEMANN ET AL.³¹⁵ und ECKART ET AL.³¹⁶ unterschiedliche Möglichkeiten zur Skalierung des Merkmals *Architektur* vorgestellt. In Anlehnung an diese Arbeiten werden vorliegend die Ausprägungen integral, teilweise integral und modular verwendet.

Das Merkmal *Betroffenes Objekt* beschreibt, an welchem Element eine Änderung ansetzt. Es kann sich dabei zum Beispiel um ein Bauteil, einen Prozess oder ein Dokument handeln. Es ist das Objekt zu nennen, von dem die Änderung ausgeht. Wird zum Beispiel die Größe eines Bauteils geändert, dann wird wahrscheinlich auch das Zeichnungsdokument geändert. Als betroffenes Objekt ist aber das Bauteil zu wählen, da die Änderung von diesem stammt. Das *Objekt* allein enthält dabei nur bedingt Hinweise auf die Aufwände von Änderungen, ist jedoch insbesondere für die Definition der Änderung als wichtig anzusehen. In Anlehnung an die Arbeiten von BELENER³¹⁷ und KAISER³¹⁸ werden die Ausprägungen des Merkmals *Objekt* definiert. Dabei kann das Objekt in Produkt, Betriebsmittel, Prozess, Baugruppe, Komponente und Dokument unterschieden werden.

Das Merkmal *Objektspezifikation* beschreibt, was an dem Objekt geändert wird. Dies können bspw. physikalische Größen sein, wie die Abmessungen oder die Form eines Bauteils, aber auch die Funktionsweisen oder die Software eines Produkts. Die *Objektspezifikation* steht dabei in einem engen Zusammenhang mit dem *Objekt*. Die Ausprägungen werden in Anlehnung an HAMRAZ³¹⁹ und EVERSHEIM ET AL.³²⁰ abgeleitet. Dadurch kann bei diesem Merkmal unterschieden werden zwischen der physikalischen Spezifikation (z.B. Größe, Form, Material, Oberfläche, Geschwindigkeit, Wirkungsgrad etc.), der Funktionsweise (z.B. Mechanik, physikalische Wirkprinzipien, elektrische Schaltungen etc.), Software, der Vorgehensweise (z.B. bei Prozessen, in der Produktion, bei der Montage etc.) und Information (z.B. in Zeichnungen, auf Stücklisten etc.).

Das Merkmal *Dringlichkeit* beschreibt, innerhalb welchen Zeitrahmens eine Änderung umgesetzt werden sollte oder muss. So müssen bspw. sicherheitsrelevante Ände-

³¹⁴ Vgl. Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 114

³¹⁵ Vgl. Lindemann et al. (1998), The Development Department and Engineering Change Management

³¹⁶ Vgl. Eckert et al. (2005), Predictability of Change in Engineering: A Complexity View

³¹⁷ Vgl. Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse, S. 36

³¹⁸ Vgl. Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst

³¹⁹ Vgl. Hamraz (2013), Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme, S. 20

³²⁰ Vgl. Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen, S. 61

rungen so schnell wie möglich realisiert werden. Kleinere Produktoptimierungen wiederum sollten möglichst kosteneffizient in Form von Releases erfolgen. Diese können häufig gebündelt als Produktupdates oder im Rahmen einer Modellpflege implementiert werden. Dabei haben nicht zeitkritische Änderungen insbesondere den Vorteil, dass sich initiale Änderungsaufwände durch die Bündelungen reduzieren lassen. Das Merkmal Dringlichkeit lässt sich daher in zeitbezogene Ausprägungen einordnen. Dies geschieht in Anlehnung an die Ausführungen von JARRATT ET AL.³²¹ und KAISER³²². Als Ausprägungen werden hier Ad-hoc-Änderungen, wichtige kurzfristige Änderungen und Release-Änderungen definiert.

Das Merkmal *Änderungsgrund* beschreibt, weshalb eine technische Änderung überhaupt notwendig ist. In diesem Zusammenhang ist oft von Ist- und Soll-Zuständen die Rede. Die Art der Abweichung des Ist- vom Soll-Zustand ist dabei eng verbunden mit der Ursache der Änderung. Dabei sind Änderungsgründe in der Literatur sehr gut untersucht und vielfältig beschrieben. In Anlehnung an SHANKAR ET AL.³²³, FANG ET AL.³²⁴; FELDHUSEN ET AL.³²⁵ und LEE ET AL.³²⁶ sind die folgenden Ausprägungen abgeleitet worden: Kundenanforderungen, Gesetze und Zertifizierung, Sicherheit, Kosten, Technik (beinhaltet Technologie, Funktion und Konstruktion des Produkts) und Produktivität (beinhaltet Produktion, Logistik, Einkauf und Materialversorgung).

Das Merkmal *Änderungsnotwendigkeit* differenziert zwischen zwingend notwendigen Änderungen und Änderungen, die durchgeführt werden können, jedoch nicht müssen. Ob eine Änderung ausgeführt werden muss, kann von zahlreichen Einflussfaktoren abhängig sein und ist nicht immer eindeutig bestimmbar. Ausschlaggebend ist besonders der wirtschaftliche Einfluss des Änderungsauftrags auf das Unternehmen. Ist es für die Unternehmenssubstanz essenziell, die Änderung zu vollziehen, wird von einer Muss-Änderung gesprochen. Darunter fallen unter anderem regulatorisch oder sicherheitstechnisch geforderte Änderungen. Kann-Änderungen werden dagegen aus Funktionsverbesserungen oder Kosteneinsparungen induziert. In Anlehnung an GILLE³²⁷ und LINDEMANN ET AL.³²⁸ kann dieses Merkmal dementsprechend in die zwei Ausprägungen Muss- und Kann-Änderung unterschieden werden.

³²¹ Vgl. Jarratt et al. (2011), Engineering change, S. 110

³²² Vgl. Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst

³²³ Vgl. Shankar et al. (2012), Reasons for change propagation: a case study in an automotive OEM, S. 295f.

³²⁴ Vgl. Fang et al. (2012), Research of Engineering Change Analysis, S. 285

³²⁵ Vgl. Feldhusen et al. (2013), Pahl/Beitz Konstruktionslehre, S. 111

³²⁶ Vgl. Lee et al. (2007), Capturing and reusing knowledge in engineering change management, S. 376

³²⁷ Vgl. Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 58

³²⁸ Vgl. Lindemann et al. (1998), Integriertes Änderungsmanagement, S. 179f.

Das Merkmal *Änderungsursache* beschreibt die Ursache, aus welcher die Änderung entstanden ist, also warum es eine Abweichung zwischen Ist- und Soll-Zustand gibt. Sie ist eng verbunden mit dem Grund der Änderung. In Anlehnung an BELENER³²⁹ können die folgenden Ausprägungen zu diesem Merkmal abgeleitet werden: Ist-Zustand fehlerhaft (z.B. nicht den Anforderungen genügend), Optimierung des Ist-Zustands möglich (z.B. bei neuen kostengünstigeren Herstellverfahren), Soll-Vorgaben verändert (z.B. durch veränderte Gesetze oder veränderte Kundenanforderungen), Soll-Vorgaben falsch beschrieben (z.B. durch fehlerhafte Kommunikation).

Die Merkmale *Initiator der Änderung*, *Problemtteil*, *Zulassungsrelevanz* und *benötigte Kapazitäten*, welche ebenfalls Teil des Änderungsclusters sind, werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet. Auch wenn es möglich ist, diese Merkmale zu operationalisieren, ist der Mehrwert der Aussagen in Bezug auf die Aufwände technischer Änderungen als nicht ausreichend zu betrachten.

Ähnlichkeitscluster II: Änderungskomplexität

Der zweite Ähnlichkeitscluster umfasst die Merkmale *Änderungsvolumen*, *Komplexität*, *Risiko der Fortpflanzung*, *Umfang der Änderung* und *Beziehung zu anderen Änderungen*. Das Merkmal *Änderungsvolumen* war dabei ebenfalls bereits Teil des ersten Änderungsclusters. Dies hängt mit dem großen Einfluss und der erheblichen Beeinflussung dieses Merkmals durch andere Merkmale zusammen. In diesem Fall ist eine Einteilung in mehrere Cluster durch den Idicula-Gutierrez-Thebeau-Algorithmus³³⁰ möglich. Alle in diesem Cluster vorkommenden Merkmalen stehen in Beziehung zur Komplexität einer Änderung. Diese wiederum kann auf Basis der Merkmale *Risiko der Fortpflanzung*, *Umfang der Änderung* und *Beziehung zu anderen Änderungen* ausgedrückt werden.

Das Merkmal *Risiko der Fortpflanzung* beschreibt, ob sich die Änderung an der betrachteten Komponente auf andere Bauteile fortpflanzt. Dieses Phänomen ist unter dem Namen Änderungspropagation bekannt. Die Fortpflanzung von Änderungen beeinflusst den Prozess maßgeblich, indem die Bearbeitungszeit eines Änderungsantrags durch Folgeänderungen verlängert wird. Dementsprechend ist es von wesentlicher Bedeutung, zu ermitteln, ob sich eine Änderung auf andere Bauteile überträgt. Nachfolgend erfolgt die Definition der Ausprägungen in Anlehnung an die Arbeit von ECKERT³³¹ und wird dabei vereinfacht als binär dargestellt. Daraus ergeben sich die Ausprägungen *Änderungsfortpflanzung erwartet* oder *Änderungsfortpflanzung nicht*

³²⁹ Vgl. Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse, S. 36

³³⁰ Vgl. Borjesson et al. (2012), Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix, S. 923ff.

³³¹ Vgl. Eckert et al. (2004), Change and customisation in complex engineering domains

erwartet. Eine Änderung ist als komplexer anzusehen, wenn eine Änderungsfortpflanzung erwartet wird.

Das Merkmal *Umfang der Änderung* beschreibt die verschiedenen Arten von Objekten einer Änderung, welche neben dem in erster Linie betroffenen Objekt geändert werden müssen. Es handelt sich dabei also um die sekundären Änderungsobjekte. Bei diesem Merkmal gilt es zu beachten, dass die Ausprägung mit dem größten Einfluss auf die Kosten zu wählen ist. Sind bspw. durch die Änderung eines Moduls (primäres Änderungsobjekt) auch Komponenten, Montageprozesse und Zeichnungsdokumente zu ändern, wird die Ausprägung Prozess gewählt, da diese die größte Auswirkung auf die Kosten hat. Die Ausprägungen sind daher nach dem Einfluss auf die Kosten absteigend sortiert. Die Ausprägungen des Merkmals sind als Produkt, Betriebsmittel, Baugruppe, Prozess, Komponente und Dokument definiert.³³²

Die Merkmale *Komplexität*, und *Beziehung zu anderen Änderungen*, welche ebenfalls Teil des Änderungsclusters sind, werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet. Die Komplexität einer Änderung kann maßgeblich durch die bereits operationalisierten Merkmale innerhalb dieses Clusters beschrieben werden. Die Beziehungen zu anderen Änderungen ist ebenfalls maßgeblich durch den Änderungsumfang und die Fortpflanzung der Änderung gegeben.

Ähnlichkeitscluster III: Änderungsausdehnung

Der dritte Ähnlichkeitscluster umfasst die Merkmale *Betroffene Stakeholder*, *Phase des Lebenszyklus* und *Betroffene Marktausdehnung*. Damit fasst dieser Cluster die Ausdehnung der technischen Änderungen zusammen.

Das Merkmal *Betroffene Marktausdehnung* beschreibt, ob das zu ändernde Objekt nur regional oder international angeboten wird. ARMANN³³³ beschreibt dabei insbesondere Standortverteilung bei der Produktentwicklung und Produktion als Ursachen für langwierige Änderungsprozesse. Weiterhin gilt es zu beachten, dass auf regionalen Märkten häufig weniger Regeln, Vorschriften und Normen zu beachten sind als bei einem internationalen Vertrieb eines Produkts.³³⁴ Aufgrund dieser Abweichungen sind bei internationaler Marktausdehnung höhere Änderungsaufwände zu erwarten als bei einer regionalen Änderungsausdehnung.

Das Merkmal *Betroffene Stakeholder* beschreibt, welche Abteilungen innerhalb des Unternehmens oder welche externen Beteiligten in die Bearbeitung einer Änderung einbezogen werden müssen. Während manche Änderungen komplett innerhalb einer

³³² Vgl. Riesener et al. (2020), Derivation of description features for engineering change request by aid of latent dirichlet allocation, S. 697ff.

³³³ Vgl. Aßmann (2014), Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung, S. 51

³³⁴ Vgl. Knack (2006), Betriebswirtschaftslehre für Technologie und Innovation, S. 182

Entwicklungsabteilung bearbeitet werden können, werden bei kritischen Änderungen häufig weitere Abteilungen und externe Beteiligte hinzugezogen. Hierdurch ist ein höherer Arbeitsaufwand und Koordinationsbedarf bei der Bearbeitung zu erwarten. Die Ausprägungen wurden in Anlehnung an EVERSHEIM ET AL.³³⁵ und LANGER ET AL.³³⁶ definiert. Sie sind in Einbezug externer Stakeholder, Einbezug der Geschäftsführung, F&E zusammen mit weiteren Abteilungen und Forschung und Entwicklung gegliedert. Auch hier gilt es die Ausprägung mit den größten Auswirkungen zu wählen. Werden sowohl die Geschäftsführung als auch externe Stakeholder einbezogen, ist die Ausprägung Einbezug externe Stakeholder zu wählen, da hier der Koordinationsaufwand und damit die Auswirkung auf Kosten und Zeit am größten ist. Die Ausprägungen sind in absteigender Reihenfolge hinsichtlich des zu erwartenden Aufwands angegeben.

Das Merkmal *Phase des Lebenszyklus* beschreibt, wie weit ein Element in seinem Lebenszyklus fortgeschritten ist. Dies hat erheblichen Einfluss auf die Änderungskosten. In diesem Zusammenhang wird häufig von der „Rule of Ten“ ausgegangen, welche von einem exponentiellen Anstieg der Kosten mit jeder Phase des Lebenszyklus ausgeht. In Anlehnung an KAISER³³⁷, EVERSHEIM ET AL.³³⁸ und LANGER ET AL.³³⁹ werden die Ausprägungen als Entwicklungsphase, Prototypenphase, Serienproduktion und Nutzungsphase definiert.

Ähnlichkeitscluster IV: Schadensausmaß

Im vierten und abschließenden Ähnlichkeitscluster sind die Merkmale *Zeitliche Gültigkeit* und *Sicherheitsrelevanz* enthalten. Diese Merkmale können als Cluster des Schadensausmaßes beschrieben werden.

Das Merkmal *Zeitliche Gültigkeit* beschreibt, ab welchem Zeitpunkt eine Änderung wirksam ist. Im Gegensatz dazu steht die Dringlichkeit einer Änderung, welche beschreibt, wann eine Änderung durchgeführt werden muss. Muss eine Änderung sofort durchgeführt werden, ist weiter zu differenzieren, ob nur die Produkte eine Änderung erhalten, die nach dem Zeitpunkt des Änderungsantrags produziert werden, oder bereits produzierte Einheiten zurückgerufen werden müssen. Wird eine Änderung geplant eingeführt, können bereits produzierte Einheiten aus dem Lager noch verkauft werden. Es ist ebenso denkbar, dass eine Änderung am Produkt nur durch einen speziellen Kundenwunsch ausgelöst wird und nach Produktion des Auftrags wieder zum

³³⁵ Vgl. Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen, S. 61

³³⁶ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 27

³³⁷ Vgl. Kaiser (1993), Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst; Homburg (2017), Marketingmanagement, S. 4

³³⁸ Vgl. Eversheim et al. (1997), Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen, S. 61

³³⁹ Vgl. Langer et al. (2012), Änderungsmanagement-Report 2012, S. 8

ursprünglichen Produkt zurückgekehrt wird. In Anlehnung an EHRENSPIEL³⁴⁰ ergeben sich die Ausprägungen für dieses Merkmal zu den folgenden: sofort und rückwirkend – sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags, ab dem Verbrauch des Restbestands) und für den Zeitraum eines Auftrags.

Das Merkmal *Sicherheitsrelevanz* wird im weiteren Verlauf des Beschreibungsmodells nicht näher betrachtet. Dieser Aspekt findet sich insbesondere in der Kombination der bereits vorhandenen Merkmale wieder. So sind sicherheitsrelevante Bauteile häufig von Gesetzten und Zertifizierungen betroffen, welche bereits als Ausprägung des Merkmals *Grund der Änderung* existieren. Weiterhin bezeichnen sicherheitsrelevante Änderungen Änderungen, welche in jedem Fall durchgeführt werden müssen um die Sicherheit eines Produktes zu gewährleisten. Dadurch kann das Merkmal *Notwendigkeit der Änderung* mit der Ausprägung *Muss-Änderung* ebenfalls für die Sicherheitsrelevanz herangezogen werden.

5.1.3 Zusammenfassung der operationalisierten Änderungsmerkmale

Nachdem in den vorherigen Teilkapiteln zuerst die Merkmale der technischen Änderungen mittels einer Literaturanalyse identifiziert und anschließend konsolidiert wurden, folgte anschließend deren Operationalisierung. Dabei lag der Fokus auf der Reduktion der notwendigen Merkmale zur Beschreibung technischer Änderungen, um diese hinsichtlich ihrer resultierenden Aufwände zu differenzieren. Nachfolgend sind die Kernergebnisse grafisch dargestellt (siehe Abbildung 5-6).

³⁴⁰ Vgl. Ehrlenspiel (1993), Änderungskosten in der Auftragsabwicklung, zitiert nach Gebhardt (2018), S. 62.

Merkmal	Ausprägungen					
Änderungsvolumen	Produktportfolio		Produkterie	Produktcharge		Einzelposition
Betroffene Objektspezifikation	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Software	Vorgehensweise	Informationen	
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Dringlichkeit	Ad-Hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release Änderung	
Grund der Änderung	Kunden-anforderung	Gesetze & Zertifizierung	Sicherheit	Kosten	Technik	Produktivität
Architektur	Integral		Teilweise Integral		Modular	
Ursache der Änderung	Ist-Zustand fehlerhaft		Optimierung des Ist-Zustands	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	
Notwendigkeit der Änderung	Kann-Änderung			Muss-Änderung		
Risiko der Fortpflanzung	Änderungfortpflanzung erwartet			Änderungfortpflanzung nicht erwartet		
Betroffene Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder		Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen		F&E
Phase des Lebenszyklus	Entwicklungsphase		Prototypenphase	Serienproduktion		Nutzungsphase
Betroffene Marktausdehnung	Regional			International		
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend		Sofort ab Zeitpunkt des Änderungsauftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument

Abbildung 5-6: Beschreibungsmodell technischer Änderungen

Die Ergebnisse werden in Unterkapitel 5.2 wieder aufgegriffen. Sie bilden den Input für die Ableitung differenzierbarer Grundtypen, welche im Folgenden adressiert wird.

5.2 Differenzierbare Grundtypen technischer Änderungen

Innerhalb des zweiten Teilmodells erfolgt die Ableitung von differenzierbaren Grundtypen technischer Änderungen. Hierzu bildet das zuvor entwickelte Beschreibungsmodell die Grundlage. Die Typenbildung ist die zweite Stufe der Komplexitätsreduktion des Problems, der Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen. Das Ziel ist es dabei, Änderungstypen mit ähnlichen Aufwänden zu identifizieren, um somit anschließend eine Vorhersage der Aufwände auf Basis dieser Änderungstypen zu treffen. Die Forschungsfrage für das Teilarbeitsmodell lautete dementsprechend:

Wie lassen sich mittels typenbildender Merkmale Grundtypen technischer Produktänderungen ableiten?

Phase des CRISP-DM-Modells	Vorgehen im zweiten Methodikschritt
Datenverständnis	5.2.1 Exkurs: Typenbildende Verfahren
	5.2.2 Bestimmung der typenbildenden Merkmale
	5.2.3 Konsistenzanalyse typenbildender Merkmale
	5.2.4 Definition der Grundtypen technischer Änderungen

Abbildung 5-7: Übersicht des zweiten Teilmodells

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird zuerst das Verfahren der Typenbildung vorgestellt. Dieses kann in Anlehnung an PAULUKUHN³⁴¹ in drei grundsätzlichen Schritten beschrieben werden. Dabei müssen zu Beginn relevante Merkmale zur Beschreibung des Untersuchungsgegenstands systematisch abgeleitet werden. Anschließend werden die Merkmale operationalisiert. Diese Schritte sind bereits innerhalb des ersten Teilmodells erfolgt. Als dritter Schritt folgt die Bildung von Typen. Dabei ist der Anspruch, dass diese plausibel und in der Praxis nachweisbar sind. Weiterhin müssen sich die Typen signifikant voneinander unterscheiden. Zur Bildung von Typen können statistische und sachlogische Verfahren eingesetzt werden. Statistische Verfahren sind dabei ein Oberbegriff für statistische, empirisch begründete Verfahren. Die sachlogischen Verfahren hingegen verfolgen analytische oder synthetische Ansätze zur Ermittlung von Typen.

In Kapitel 5.2.1 folgt ein Exkurs zu den typenbildenden Verfahren, bevor die Typenbildung zur Ermittlung von Grundtypen technischer Änderungen durchgeführt wird.

5.2.1 Exkurs: Typenbildende Verfahren

Als analytische Forschungsmethode ist die Aufgabe der Typisierung, eine geordnete Menge von Untersuchungsobjekten durch zweckmäßige Auswahl von Merkmalen und Merkmalsausprägungen zu bilden. Merkmale sind charakteristische Eigenschaften der untersuchten Elemente, denen dimensionale Ausprägungen zugeordnet werden.³⁴² Als Resultat eines untersuchten Gegenstandsbereichs werden charakteristische Erscheinungsformen isolierter Objekte gebildet und als Typen bezeichnet.³⁴³ Ein *Typ* oder *Typus* charakterisiert eine gebildete Teil- oder Subgruppe mit ähnlichen Kombinationen von Merkmalsausprägungen.³⁴⁴

³⁴¹ Vgl. Paulukuhn (2005), Typologisierung von Entwicklungsprojekten im Maschinenbau

³⁴² Vgl. Kelle et al. (2010), Vom Einzelfall zum Typus, S. 86f.; Kuckartz (2010), Sozialwissenschaftliche Ansätze für die kategorienbasierte Textanalyse, S. 85; Schmidt-Hertha et al. (2011), Typologien, S. 23

³⁴³ Vgl. Welter (2006), Die Forschungsmethode der Typisierung, S. 113

³⁴⁴ Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 27ff.

Der Begriff *Typenbildung* wird als Zusammenfassung von Elementen mit Ähnlichkeiten in ausgewählten Merkmalsausprägungen zu Typen (Gruppen, Klassen, engl. Cluster) definiert.³⁴⁵ *Elemente* von Typen sind Merkmalsträger (Objekte, Fälle), die von Forschenden für die Datenerhebung festgelegt werden.³⁴⁶ Nach KUCKARTZ ist der Kern einer Typenbildung „die Suche nach mehrdimensionalen Mustern, die das Verständnis eines komplexen Gegenstandsbereichs oder eines Handlungsfelds ermöglichen“³⁴⁷. Die Typenbildung erfolgt daher resultierend aus einer Kombination von konkreten Merkmalen und Merkmalsausprägungen, welche quantitativer oder qualitativer Art sein können.³⁴⁸ Das Vorgehen wird dabei als typenbildendes Verfahren beschrieben, wobei die diskreten Merkmale typenbildende oder typenbeschreibende Eigenschaften aufweisen können. Typenbildende Merkmale konstruieren einen Typus, während typenbeschreibende Merkmale diesen Typus näher erläutern.³⁴⁹ Für die Typenbildung selbst dürfen nur typenbildende Merkmale berücksichtigt werden. Dabei erfolgt die Erfassung der Merkmale und Ausprägungen in einem Merkmalraum, welcher als ordnendes Instrument für Typologien angesehen werden kann.³⁵⁰

Der Merkmalraum ist die Basis für die Typenbildung.³⁵¹ Die Typisierung beruht auf mindestens zwei Merkmalen, die möglichst keinen linearen Zusammenhang aufweisen und sich lediglich durch die unterschiedlichen Merkmalsausprägungen differenzieren.³⁵² Alle Ausprägungen der Merkmale spannen zusammen einen n-dimensionalen Merkmalraum auf.³⁵³ Dabei kann die Ableitung der Typen auf unterschiedliche Arten erfolgen. Bei der häufig vorkommenden großen Anzahl von Merkmalen kann ein reduzierter Betrachtungsumfang einer Typologie aufgebaut werden. Alternativ dazu kann eine vollständige Typologie durch differenzierbare Typen gezielt konsolidiert werden.³⁵⁴ Dabei unterliegt jede Typenbildung dem Konzept der internen Homogenität und externen Heterogenität. Eine interne Homogenität innerhalb der Typen existiert, wenn ihre Objekte untereinander möglichst ähnlich sind. Differenzieren sich

³⁴⁵ Vgl. Kelle et al. (2010), Vom Einzelfall zum Typus, S. 86ff.

³⁴⁶ Vgl. Kelle et al. (2010), Vom Einzelfall zum Typus, S. 86

³⁴⁷ Vgl. Kuckartz (2016), Qualitative Inhaltsanalyse, S. 143

³⁴⁸ Vgl. Welter (2006), Die Forschungsmethode der Typisierung, S. 115

³⁴⁹ Vgl. Welter (2006), Die Forschungsmethode der Typisierung, S. 115

³⁵⁰ Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 35ff.

³⁵¹ Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 30; Vgl. Kuckartz (2010), Einführung in die computergestützte Analyse

³⁵² Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 27ff.; Vgl. Kuckartz (2016), Qualitative Inhaltsanalyse, S. 146

³⁵³ Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 27ff.; Vgl. Kuckartz (2016), Qualitative Inhaltsanalyse, S. 146

³⁵⁴ Vgl. Bailey (1994), Typologies and taxonomies, S. 5

Objekte homogener Typen von anderen Objekten, existiert eine externe Heterogenität zwischen den Typen.³⁵⁵

Ein Differenzierungskriterium bei der Typenbildung ist die Unterscheidung zwischen Ideal- und Realtypen.³⁵⁶ Werden Typologien auf Basis von idealtypischen bzw. theoretischen Gedankenfolgen abgeleitet, werden diese Konstruktionen als *heuristische* bzw. *künstliche Typologien* bezeichnet.³⁵⁷ Künstliche Typologien werden ohne direkten Bezug zu empirischen Daten und deduktiv gebildet. Sie bestehen aus Kombinationen von Merkmalsausprägungen, die in der Realität nicht vorkommen müssen.³⁵⁸ Im Gegensatz dazu wird die Konstruktion einer Typologie auf Basis von Realtypen auch als empirische bzw. *natürliche Typologie* bezeichnet. Natürliche Typologien werden auf Basis wiederholbarer Daten induktiv gebildet und berücksichtigen multivariate Verteilungen der Elemente in der Realität.³⁵⁹ Die Zuordnung der Objekte zu Typen findet damit nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit statt. Die daraus gebildeten Typen weisen Objekte auf, die sich nur sehr ähnlich sind, statt völlig gleich.³⁶⁰ Natürliche Typologien lassen sich intellektuell bzw. geistig ordnen oder durch formalisierte und statistische Algorithmen bzw. clusteranalytische Verfahren bilden.³⁶¹

Nach ZELEWSKI³⁶² besitzen Typologien in der Realwirtschaft drei Erkenntnisziele zur Beschreibung, Erklärung und Gestaltung realer Sachverhalte. Aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten auf Untersuchungsobjekte wird die Typisierung in vielen Disziplinen angewendet. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, technische Änderungen mittels einer Typologie so zu ordnen, dass Grundtypen technischer Änderungen mit ähnlichen Charakteristika hinsichtlich ihrer Aufwände beschrieben werden können. Anschließend werden die Aufwände der Grundtypen bestimmt. Dabei kann das Verfahren bei einer großen Anzahl sinnvoller Typen um eine typologische Reduktion erweitert werden. Hier werden vier unterschiedliche Ansätze differenziert: (1) Vereinfachung der Dimensionen, (2) forschungspragmatische Reduktion, (3) funktionale Reduktion und (4) numerische Reduktion. Im Zuge der vorliegenden Arbeit sind insbesondere die Vereinfachung der Dimensionen, die forschungspragmatische Reduktion und die funktionale Reduktion relevant. Diese werden zur Reduktion der vorliegenden Typen genutzt, um eine handhabbare Anzahl an Typen zu erhalten.

³⁵⁵ Vgl. Bailey (1994), *Typologies and taxonomies*, S. 1f.; Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 26f.

³⁵⁶ Vgl. Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 58

³⁵⁷ Vgl. Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 58

³⁵⁸ Vgl. Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 59f.

³⁵⁹ Vgl. Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 60

³⁶⁰ Vgl. Kuckartz (2016), *Qualitative Inhaltsanalyse*, S. 150f.

³⁶¹ Vgl. Kluge (1999), *Empirisch begründete Typenbildung*, S. 60

³⁶² Vgl. Zelewski (2008), *Grundlagen*

Auf die numerische Reduktion wird im Zuge der Arbeit nicht eingegangen. Die Vereinfachung der Dimensionen kann durch eine Vereinfachung der Skalenniveaus erreicht werden. Dabei können Skalen mit mehreren Merkmalen bspw. in dichotome Merkmalsausprägungen überführt werden. Die forschungspragmatische Reduktion beschreibt die Zusammenlegung von Typen, wenn deren Unterscheidung zur Beantwortung der Forschungsfrage nicht sinnvoll ist. Weiterhin ist die funktionale Reduktion, zur Reduktion von Typen relevant. Hierbei werden Merkmalsausprägungen die gar nicht oder sehr selten auftreten, reduziert.³⁶³

Nachdem innerhalb des Exkurses das typenbildende Verfahren vorgestellt wurde, erfolgt anschließend die Anwendung des Verfahrens. Dazu werden in einem ersten Schritt die typenbildenden Merkmale bestimmt.

5.2.2 Bestimmung der typenbildenden Merkmale

Ziel des Arbeitsschritts ist es, typenbildende Merkmale zur Ableitung der Grundtypen technischer Änderungen zu identifizieren. Hierzu müssen zu Beginn die Einflussfaktoren mit Relevanz zur Unterschreidung von technischen Änderungen aus dem gegebenen Merkmalraum bestimmt werden. Der initiale Merkmalraum wurde bereits in Teilkapitel 5.1.3 dargestellt. Ausgehend hiervon gilt es die Komplexität des Merkmalraums mittels Festlegung typenbildender Merkmale zu reduzieren.

Die systematische Analyse der Vernetzung und das Zusammenspiel zwischen den Einflussfaktoren aus Teilkapitel 5.1.3 erfolgt dabei in Analogie zum „Papiercomputer“ nach VESTER³⁶⁴. Die Einflussfaktoren werden in einer Prioritätenmatrix in den Zeilen von oben nach unten und in den Spalten von links nach rechts in der gleichen Reihenfolge gegenübergestellt. Anschließend erfolgt die Bewertung jedes Einflussfaktoren-paares der folgenden Plausibilitätsüberlegung: *Bei einer Veränderung des Einflussfaktors A (Zeile) ist zu überprüfen, wie stark die direkte Veränderung von Einflussfaktor B (Spalte) wäre.* Die Bewertung erfolgt anhand einer vierstufigen Skala, welche der Abbildung 5-8 entnommen werden kann.

³⁶³ Vgl. Kluge (1999), Empirisch begründete Typenbildung, S. 110ff.

³⁶⁴ Vgl. Vester (1999), Die Kunst vernetzt zu denken

Einflussmatrix
zur paarweisen Einflussanalyse

Bewertungsskala:
0 = keinen Einfluss
1 = schwacher Einfluss
2 = mittlerer Einfluss
3 = starker Einfluss

	Betroffenes Objekt	Betroffene Objektspezifikation	Umfang der Änderung	Änderungsvolumen	Phase des Lebenszyklus	Architektur	Grund der Änderung	Ursache der Änderung	Notwendigkeit der Änderung	Dringlichkeit	Betroffene Stakeholder	Betroffene Marktausdehnung	Zeitliche Gültigkeit	Risiko der Fortpflanzung	Aktivsumme	Impuls-Index Quotientenwert	Aktiver/Reaktiver Einflussfaktor	Dynamik-Index Produktwert	Puffernder/Kritischer Einflussfaktor	Zuordnung
Betroffenes Objekt	3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	2	0	2	2	12	4.0	Puffernd	36	Kritisch	Typenbildend
Betroffene Objektspezifikation	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0	0	3	0.5	Puffernd	18	Puffernd	Typenbeschreibend
Umfang der Änderung	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	4	0.4	Aktiv	36	Kritisch	Typenbildend
Änderungsvolumen	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	4	0.8	Reaktiv	20	Puffernd	Typenbeschreibend
Phase des Lebenszyklus	0	0	0	1	3	0	0	0	1	2	2	1	1	0	8	0.0	Reaktiv	0	Puffernd	Typenbeschreibend
Architektur	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	7	0.0	Aktiv	0	Puffernd	Typenbeschreibend
Grund der Änderung	3	3	3	1	0	0	3	3	0	0	2	0	2	0	18	18.0	Reaktiv	18	Puffernd	Typenbeschreibend
Ursache der Änderung	0	0	0	0	0	0	1	3	2	0	0	2	0	0	8	0.0	Reaktiv	0	Puffernd	Typenbeschreibend
Notwendigkeit der Änderung	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	2	0	3	0.3	Reaktiv	30	Kritisch	Typenbildend
Dringlichkeit	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0.2	Reaktiv	22	Puffernd	Typenbildend
Betroffene Stakeholder	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0.0	Puffernd	0	Puffernd	Typenbeschreibend
Betroffene Marktausdehnung	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0.0	Puffernd	0	Puffernd	Typenbeschreibend
Zeitliche Gültigkeit	0	0	0	3	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	4	0.3	Reaktiv	48	Kritisch	Typenbildend
Risiko der Fortpflanzung	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	3	0.4	Aktiv	21	Puffernd	Typenbeschreibend	
Passivsumme	3	6	9	5	0	0	1	0	10	11	10	2	12	7						

Abbildung 5-8: Einflussmatrix zur Festlegung typenbildender Merkmale

Aus der vollständig ausgefüllten Matrix werden die vier charakteristischen Kennwerte abgeleitet, welche zur Festlegung der typenbildenden Merkmale genutzt werden:³⁶⁵

Die **Aktivsumme** (AS) eines Einflussfaktors, die sich aus der Zeilensumme aller Beziehungswerte berechnet. Sie gibt Aufschluss über die Wirkung eines jeweiligen Einflussfaktors auf alle anderen Einflussfaktoren im System.

Die **Passivsumme** (PS) eines Einflussfaktors, die sich aus der Spaltensumme aller Beziehungswerte berechnet. Sie trifft eine Aussage über die Empfindlichkeit einer Beeinflussung eines Einflussfaktors durch alle übrigen Einflussfaktoren im System.

Der **Impuls-Index** (IPI) eines Einflussfaktors gilt als Maß seines direkten Einflusses, ohne Veränderungen zu erfahren. Der jeweilige IPI ist der Quotient aus AS und PS. Einflussfaktoren mit den größten IPI (hohe AS und niedrige PS) werden als **aktive bzw. impulsive** Einflussfaktoren bezeichnet. Sie zeigen mehr Einfluss auf die Problemsituation und eine geringere Beeinflussbarkeit. Diese Faktoren werden auch als Hebel charakterisiert. Einflussfaktoren mit den niedrigsten IPI (niedrige AS und hohe PS) werden als **reaktive bzw. passive** Einflussfaktoren bezeichnet. Sie zeigen weniger Einfluss auf die Problemsituation, aber eine starke Beeinflussbarkeit. Diese Faktoren sind gute Indikatoren zur Beobachtung der Situation.

³⁶⁵ Vgl. Vester (1999), Die Kunst vernetzt zu denken, S. 226ff.; Wilms (2006), Szenariotechnik, S. 51; Kosow et al. (2008), Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse, S. 39ff.

Der **Dynamik-Index** (DI) eines Einflussfaktors gilt als Maß für seine direkte Vernetzung mit dem System und den Einfluss auf dieses. Der jeweilige DI ist das Produkt aus AS und PS. Einflussfaktoren mit dem größten DI (hohe AS und hohe PS) werden als **kritische bzw. dynamische** Einflussfaktoren bezeichnet. Sie zeigen starken Einfluss auf die Problemsituation und weisen eine starke Beeinflussbarkeit auf. Diese Faktoren zeigen eine starke Vernetzung mit anderen Faktoren. Einflussfaktoren mit den niedrigsten DI (niedrige AS und niedrige PS) werden als **puffernde bzw. träge** Einflussfaktoren bezeichnet. Sie zeigen schwachen Einfluss auf die Problemsituation und werden nur schwach beeinflusst. Diese Faktoren sind isoliert.

Auf Basis dieser Kennwerte können die typenbildenden Einflussfaktoren ermittelt werden. Nach WILMS³⁶⁶ sind dafür gut beeinflussbare aktive Einflussfaktoren mit möglichst guter Hebelwirkung und mit möglichst kurzen Veränderungsfristen erwünscht. Als Ergebnis werden die folgenden fünf Merkmale identifiziert: *Betroffenes Objekt, Umfang der Änderung, Notwendigkeit der Änderung, Dringlichkeit* und *Zeitliche Gültigkeit*. Die übrigen Einflussfaktoren werden als typenbeschreibende Einflussfaktoren bezeichnet und in Unterkapitel 5.4 zur detaillierten Beschreibung der abgeleiteten Grundtypen herangezogen.

Nach der Ableitung der typenbildenden und typenbeschreibenden Merkmale (Abbildung 5-8) folgt im anschließenden Teilkapitel die Analyse der typenbildenden Merkmale.

5.2.3 Konsistenzanalyse typenbildender Merkmale

Ziel des Arbeitsschrittes ist es, die zuvor identifizierten typenbildenden Merkmale hinsichtlich ihrer paarweisen Konsistenz zu bewerten, damit anschließend die Grundtypen technischer Änderungen abgeleitet werden können. In diesem Teilkapitel werden alle möglichen Kombinationen der Merkmale mit ihren Ausprägungen paarweise bewertet, analysiert und aufgelistet. Diese Auflistung bildet die möglichen Szenarien ab und wird anschließend zur Ableitung der Grundtypen technischer Änderungen genutzt.

Die Kombination von widerspruchsfreien Ausprägungen ist für die Ableitung von konsistenten Szenarien ein entscheidendes Kriterium.³⁶⁷ Hierzu müssen die Kombinationen der verschiedenen Ausprägungen eines Merkmals miteinander verglichen werden. Dabei ist es ausreichend, eine Seite der Konsistenzmatrix auszuwerten, da die Matrix

³⁶⁶ Vgl. Wilms (2006), Szenariotechnik, S. 13ff.

³⁶⁷ Vgl. Mietzner (2009), Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen, S. 120

symmetrisch ist³⁶⁸. Für die paarweise Konsistenzbewertung der Ausprägungspaare wird auf die Bewertungskriterien der Szenario-Software INKA 4 zurückgegriffen.³⁶⁹

Tabelle 5-2: Bewertungskriterien der Konsistenzanalyse

-3	Totale Inkonsistenz, d.h., die beiden Ausprägungen schließen einander zwingend aus und können nicht zusammen in einem glaubwürdigen Szenario vorkommen.
-2	Inkonsistenz, d.h., die Kombination der beiden Ausprägungen ist widersprüchlich und ein gemeinsames Auftreten in einem Szenario ist unwahrscheinlich.
-1	Partielle Inkonsistenz, d.h., die beiden Ausprägungen passen schlecht zueinander, können aber durchaus gemeinsam in einem Szenario vorkommen.
0	Neutral oder kein Zusammenhang, d.h., die Kombination der beiden Ausprägungen hat keinen Einfluss. Ihr Auftreten beeinflusst die Glaubwürdigkeit eines Szenarios nicht.
1	Gegenseitige Unterstützung, d.h., die Kombination der beiden Ausprägungen bewirkt ein positives oder vorteilhaftes Miteinander und kann in einem Szenario vorkommen.
2	Starke gegenseitige Unterstützung, d.h., die beiden Ausprägungen begünstigen sich gegenseitig und können gut zusammen in einem Szenario vorkommen.
3	Sehr starke gegenseitige Unterstützung, d.h., die Kombination der beiden Ausprägungen ist sehr wahrscheinlich und spricht für ein konsistentes Szenario.

Beim Ausfüllen der Konsistenzmatrix wird gemäß FINK ET AL.³⁷⁰ wie folgt vorgegangen: **Es werden Blöcke bewertet.** Die Bewertung erfolgt schrittweise zwischen zwei Merkmalen und den Kombinationen der Ausprägungen.

Es werden direkte Beziehungen berücksichtigt. Zur Vermeidung von Überbewertungen werden nur direkte Beziehungen der Projektionen zueinander betrachtet. Eine Beeinflussung, die nicht in direktem Zusammenhang stehen, sondern über mehrere Elemente nur indirekt im Zusammenhang stehen werden nicht bewertet. Ist kein direkter Zusammenhang zu erkennen, werden alle Felder des entsprechenden Blocks mit

³⁶⁸ Vgl. Mißler-Behr (1993), Methoden der Szenarioanalyse, S. 34; Schietke (2013), Pandemische Influenza in Deutschland 2020, S. 10

³⁶⁹ Vgl. Schwarz-Geschka (2021), INKA 4 - Die Software zur Entwicklung von Szenarien

³⁷⁰ Vgl. Fink et al. (2016), Szenario-Management, S. 102f.

„0“ bewertet. Die daraus resultierende Leitfrage für die Vorgehensweise lautet: *Besteht zwischen den betrachteten Ausprägungen eine direkte Beziehung?*

Es werden keine Wahrscheinlichkeiten bewertet. Bei einer direkten Beziehung zwischen den Projektionen wird ausschließlich die Konsistenz und keine Wahrscheinlichkeit des Eintretens bewertet. Die daraus resultierende Leitfrage für die Vorgehensweise lautet: *Ist ein gemeinsames Auftreten der Ausprägungen in einem Szenario möglich?*

Abbildung 5-9 stellt dabei einen Ausschnitt der ausgefüllten Konsistenzmatrix dar. Diese wird zur Bildung eines hochkonsistenten Katalogs von Szenarien genutzt, welcher als Grundlage für die anschließende Clusteranalyse dient. Jedes Szenario bildet dabei die Kombination von spezifischen Ausprägungen der typenbildenden Merkmale. Entsprechend der Regel der Kombinatorik handelt es sich hier um eine Variation mit Wiederholung, bei der Anordnungen von k Merkmalen mit n Ausprägungen untersucht werden.³⁷¹ So ergibt sich im Rahmen dieser Arbeit folgende Anzahl an Szenarien für die Konsistenzanalyse:

$$\prod n^k = 6^2 \times 4^1 \times 3^1 \times 2^1 = 864.$$

³⁷¹ Vgl. Brell et al. (2017), Statistik von Null auf Hundert, S. 93f.

5.2.4 Definition der Grundtypen technischer Änderungen

Ziel des Arbeitsschrittes ist es, auf Basis des Katalogs konsistenter Szenarien sowie durch die Anwendung einer Clusteranalyse die Grundtypen technischer Änderungen abzuleiten und zu beschreiben. Hierzu wird das angewendete Clusterverfahren kurz vorgestellt. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Anzahl sinnvoller Grundtypen, bevor diese abgeleitet und beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Clusterverfahren mit dem k-modes-Algorithmus für qualitative Daten angewendet. Die Clusteranalyse wird mit der Skriptsprache Python und der webbasierten Entwicklungsumgebung Jupyter Notebook mit seinem Kommandozeileninterpreter IPython erstellt.

Als Erstes wird die optimale Anzahl an Grundtypen respektive Clustern k mit dem k-modes-Algorithmus ermittelt. Dabei werden die folgenden Schritte durchlaufen³⁷²:

- Initialisiere $k = 1$.
- Starte den Durchlauf.
- Erhöhe den Wert auf k .
- Miss die Kosten für die optimale Lösung.
- Wenn die Kosten der Lösung bei einem Punkt markant abknicken.
- Das ist das wahre k .
- Ende.

Das Ergebnis wird in einem Scree-Diagramm in Abbildung 5-10 dargestellt. Aufgrund der heuristischen Vorgehensweise ist die optimale Anzahl nicht am markantesten Knickpunkt auszuwählen.³⁷³ Vielmehr ist eine anwendungsbezogene Anzahl der Cluster abzuwägen. Bezogen auf das hier dargestellte Scree-Diagramm legt die Anzahl der Cluster auch die Anzahl der zu definierenden Grundtypen fest. Dabei kann dem Diagramm entnommen werden, dass bei $k < 4$ von einer geringeren Aussagekraft der Grundtypen auszugehen ist, da die Spannweite der möglichen Szenarien für die technischen Änderungen stark eingeschränkt wird. Demgegenüber erhöht sich die Komplexität bei $k > 8$ sehr stark. Bei der Analyse des Scree-Diagramms zeigen sich die markantesten Knickpunkte bei $k = 2$, $k = 3$ und $k = 5$. Aufgrund der beschriebenen Gründe für eine überschaubare, aber aussagefähige Anzahl an Szenarien zeigt $k = 5$ den besten Fit. Das Resultat der Clusteranalyse mit dem optimalen k sind fünf Grundtypen.

³⁷² Vgl. Bholowalia et al. (2014), EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means in WSN, S. 19

³⁷³ Vgl. Fink et al. (2016), Szenario-Management, S. 23ff.

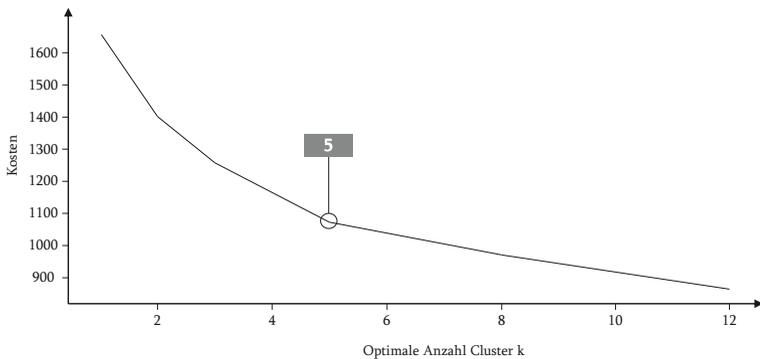


Abbildung 5-10: Festlegung der optimalen Anzahl an Grundtypen

Nach der Festlegung der optimalen Anzahl an Grundtypen erfolgt die Bestimmung der Grundtypen. Dazu werden alle konsistenten Szenarien bei der Clusteranalyse einem der fünf Cluster zugeordnet. Anschließend wird die Häufigkeit der Ausprägungen einzelner Merkmale innerhalb eines Clusters bestimmt. Für die Ermittlung der Grundtypen wird dabei nicht zwangsläufig jeweils das Merkmal mit der höchsten Ausprägung gewählt, da neben der Homogenität der Grundtypen untereinander auch die Heterogenität der Grundtypen sowie ihre Praxistauglichkeit sichergestellt werden³⁷⁴.

Die Bewertung der Cluster erfolgt dabei nach GAUSEMEIER ET AL.³⁷⁵ Hierbei wird jede Ausprägung innerhalb eines Clusters basierend auf der Häufigkeit bewertet. Es wird zwischen eindeutigen Ausprägungen, alternativen Ausprägungen und nicht relevanten Ausprägungen unterschieden. Eindeutige Ausprägungen sind Ausprägungen, die in mindestens drei Viertel aller Ausprägungsszenarien vorkommen. Sie drücken aus, dass eine charakteristische Ausprägung eines Merkmals in einem Grundtyp auftritt. Alternative Ausprägungen sind Ausprägungen, die in mehr als einem Viertel der Ausprägungsszenarien vorkommen und keine eindeutige Ausprägung sind. Sie veranschaulichen, dass mehrere Ausprägungen oder keine eindeutige Ausprägung eines Merkmals in einem Grundtyp auftritt. Nicht relevante Ausprägungen sind dabei, wie der Name bereits andeutet, zu vernachlässigen.³⁷⁶

³⁷⁴ Vgl. Kelle et al. (2010), Vom Einzelfall zum Typus, S. 85

³⁷⁵ Vgl. Gausemeier et al. (2014), Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung

³⁷⁶ Vgl. Gausemeier et al. (2014), Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, S. 66ff.

Merkmale	Ausprägung	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5
Betroffenes Objekt	Produkt	39	10	9	10	11
	Betriebsmittel	17	43	11	13	11
	Baugruppe	14	15	48	11	14
	Prozess	14	18	14	48	17
	Komponente	16	14	17	18	47
	Dokument	0	0	0	0	0
Umfang der Änderung	Produkt	39	10	9	10	11
	Betriebsmittel	17	43	11	13	11
	Baugruppe	16	14	17	18	47
	Prozess	14	18	14	48	17
	Komponente	14	15	48	11	14
	Dokument	0	0	0	0	0
Notwendigkeit der Änderung	Kann-Änderung	27	79	13	10	88
	Muss-Änderung	73	21	87	90	13
Dringlichkeit	Ad-Hoc	23	10	22	75	6
	Wichtige kurzfristige Änderung	58	20	13	15	84
	Release Änderung	19	70	66	10	9
Zeitliche Gültigkeit	Sofort und rückwirkend	24	11	22	21	19
	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags	51	25	11	18	17
	Ab dem Verbrauch des Restbestands	14	49	10	49	13
	Zeitraum eines Auftrags	12	15	56	11	52

Legende	
 Eindeutige Ausprägung	 Alternative Ausprägung
 Ausprägung tritt nicht auf	
 90	In 90 % der Szenarien des Grundtyps kommt diese Ausprägung vor

Abbildung 5-11: Häufigkeitsverteilung der Ausprägungen innerhalb der Grundtypen

Aus der Projektionsliste lässt sich **Grundtyp 1** mit dem in Abbildung 5-12 dargestellten Ausprägungsprofil ableiten. Dabei werden die Grundtypen hinsichtlich des Änderungsgegenstandes, der Eigenschaften, der Einflussfaktoren und der Auswirkungen beschrieben. Neben den typenbildenden Merkmalen werden zur Beschreibung der Grundtypen auch die typenbeschreibenden Merkmale aufgegriffen, sofern dies sinnvoll ist.

Grundtyp 1						
Merkmal	Ausprägungen					
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Notwendigkeit der Änderung	Muss-Änderung			Kann-Änderung		
Dringlichkeit	Ad-hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release-Änderung	
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags		Ab dem Verbrauch des Restbestands		Zeitraum eines Auftrags

Abbildung 5-12: Grundtyp 1

Der Grundtyp 1 wird im Folgenden beschrieben:

Grundtyp 1: „Technische Produktänderung“

Änderungsgegenstand: Die technische Änderung wird durch eine Modifikation am Produkt ausgelöst. Die Modifikation kann sich auf physikalische Spezifikationen, Funktionsweise, Software oder Vorgehensweisen am Produkt beziehen. Das Volumen der Produktänderung kann das gesamte Produktspektrum bis hin zur Einzelposition betreffen. Insbesondere in der Produktion ist der Einfluss auf die Produkterie oder Produktcharge zu beachten.

Eigenschaften: Ein Produkt mit modularer Architektur besitzt funktional voneinander entkoppelte Baugruppen und Komponenten mit klar definierten Schnittstellen, so dass eine Änderungspropagation auf weitere Objekte nicht zu erwarten ist. Demzufolge ist die Änderung von entkoppelten Elementen i.d.R. einfacher durchzuführen. Eine integrale Produktarchitektur weist komplexe Zuordnungen von Funktionen zu Komponenten und Verknüpfungen der Komponenten untereinander auf. Eine Änderungspropagation auf weitere Objekte ist zu erwarten, weshalb diese Änderungen oft schwierig durchzuführen sind.

Einflussfaktoren: Die technische Änderung wird durch die notwendigen Modifikationen primär durch Mängel oder zur Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien und Normen am Produkt ausgelöst. Die Modifikation kann sekundär als optimierende oder kostenreduzierende Maßnahme erfolgen. Die kurzfristige Änderung am Produkt ist hinsichtlich normativer Sicherheitsanforderungen zwingend notwendig. Aufgrund der geplanten Inverkehrbringung der Serienprodukte auf dem regionalen oder nationalen Markt gilt es, die spezifischen Vorschriften und Normen zu beachten. Experten aus der Forschung und Entwicklung sind zur Beseitigung der Mängel am Produkt einzubeziehen. Für die Erfüllung der Sicherheitsvorgaben ist die Priorität der Änderung hoch einzustufen und bedarf einer schnell

geplanten Realisierung. Im Serienanlauf hergestellte Produkte werden nicht auf den Markt gebracht und dienen ausschließlich der unternehmensinternen Prüfung. Die Änderung von kritischen Sicherheitsmängeln ist zwingend notwendig, da ein Schadensrisiko für Personen oder Objekte besteht. Dementsprechend ist die Geschäftsführung zur Einhaltung der unternehmerischen Organisationspflicht einzubeziehen.

Auswirkungen: Das Ignorieren oder Hinauszögern der Änderung wirkt sich negativ auf die Produktion und das Inverkehrbringen des Produkts auf dem Markt aus. Bei einer Übergabe des Produktfehlers an die Produktion steigen die Fehlerkosten exponentiell an. Grund hierfür sind die infolge der Produktion festgelegten Prozesse und die daraus resultierenden Änderungspropagationen. Die Missachtung der technischen Änderung kann die geplante und erfolgreiche Produktplatzierung auf dem Markt verhindern.

Aus der Projektionsliste lässt sich **Grundtyp 2** mit dem in Abbildung 5-13 dargestellten Ausprägungsprofil ableiten und wie folgt beschreiben:

Grundtyp 2						
Merkmal	Ausprägungen					
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Notwendigkeit der Änderung	Muss-Änderung			Kann-Änderung		
Dringlichkeit	Ad-hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release-Änderung	
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags		Ab dem Verbrauch des Restbestands		Zeitraum eines Auftrags

Abbildung 5-13: Grundtyp 2

Grundtyp 2: „Technische Betriebsmitteländerung“

Änderungsgegenstand: Die technische Änderung wird durch eine notwendige Modifikation an den Betriebsmitteln ausgelöst, um optimierende kostenreduzierende Maßnahmen oder gesetzliche Richtlinien und Normen zu erfüllen. Die Modifikation kann sich auf die physikalische Spezifikation, Funktionsweise, Software, Vorgehensweise oder Information des Betriebsmittels beziehen. Das Volumen der Änderung kann eine Einzelposition oder Produktserie bzw. Produktcharge betreffen.

Eigenschaften: Abhängig von der Art besitzen Betriebsmittel eine integrale oder modulare Architektur. Eine integrale Architektur des Betriebsmittels weist komplexe Zuordnungen von Funktionen zu Komponenten und die Verknüpfung der

Komponenten untereinander auf. Eine Änderungspropagation auf weitere Objekte ist zu erwarten. Eine modulare Architektur besitzt funktional voneinander entkoppelte Baugruppen und Komponenten mit klar definierten Schnittstellen, so dass eine Änderungspropagation auf weitere Objekte nicht zu erwarten ist. Demzufolge ist die Änderung am Produkt einfach durchzuführen.

Einflussfaktoren: Die Änderung wird durch eine technische Optimierung oder eine kostengünstigere Variante des Betriebsmittels ausgelöst. Beispiele sind Weiterentwicklungen am Werkstoff oder ein Einsatz von kostengünstigeren Ersatzmaterialien. Die von der Forschung und Entwicklung sowie weiteren Abteilungen angepasste Änderung erfolgt zur nächsten geplanten Produktfreigabe.

Auswirkungen: In Betracht kommende technische Änderungen von Betriebsmitteln beabsichtigen eine optimierende oder kostenreduzierende Maßnahme und sind auf ihre Notwendigkeit zu prüfen. Die Entscheidung ist abhängig von der Komplexität der Umsetzung in der Entwicklung und der späteren Fertigung bzw. Montage in der Produktion. Das Ignorieren oder Hinauszögern der Änderung hat keinen direkten negativen Einfluss auf die Produktion oder das Produkt. Gleichwohl besteht die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Einsparpotenzials oder einer Produktverbesserung.

Aus der Projektionsliste lässt sich **Grundtyp 3** mit dem in Abbildung 5-14 dargestellten Ausprägungsprofil ableiten und wie folgt beschreiben:

Grundtyp 3						
Merkmal	Ausprägungen					
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Notwendigkeit der Änderung	Muss-Änderung			Kann-Änderung		
Dringlichkeit	Ad-hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release-Änderung	
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags		Ab dem Verbrauch des Restbestands		Zeitraum eines Auftrags

Abbildung 5-14: Grundtyp 3

Grundtyp 3: „Kundenspezifische technische Änderung“

Änderungsgegenstand: Die technische Änderung wird durch die notwendige Modifikation an einer kundenspezifischen Baugruppe ausgelöst, die Fehlfunktionen und Mängel über ein akzeptables Maß hinaus vorweisen oder gesetzliche Richtli-

nien und Normen nicht erfüllen. Die Änderung betrifft die Baugruppe und die dazugehörigen Komponenten. Fehlfunktionen können bspw. Mängel an der Mechanik oder an elektrischen Schaltungen sein. Das Volumen der Änderung kann eine Einzelposition oder Produktserie bzw. Produktcharge betreffen.

Eigenschaften: Modular aufgebaute Baugruppen besitzen funktional voneinander entkoppelte Komponenten. Eine Änderungspropagation auf weitere Objekte ist nicht zu erwarten. Demzufolge ist die Änderung an den Baugruppen und Komponenten einfach durchzuführen. Eine Baugruppe mit integraler Architektur weist komplexe Zuordnungen von Funktionen zu Komponenten und Verknüpfungen der Komponenten untereinander auf. Eine Änderungspropagation auf weitere Objekte ist zu erwarten.

Einflussfaktoren: Die technische Änderung ist aufgrund von Fehlern und Mängeln in der Technik sowie Sicherheit oder zur Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien und Normen vorzunehmen. Abhängig vom Kunden sind regionale und internationale Richtlinien stets zu berücksichtigen. Die von der Forschung und Entwicklung angepasste Änderung erfolgt zur nächsten geplanten Freigabe der Baugruppe.

Auswirkungen: Das Ignorieren oder Hinauszögern der Änderung wirkt sich negativ auf die Produktion der kundenspezifischen Baugruppe aus. Bei einer Übergabe des Produktfehlers an die Produktion steigen die Fehlerkosten exponentiell an. Grund hierfür sind die infolge der Produktion festgelegten Prozesse und die daraus resultierenden Änderungspropagationen. Die Missachtung der technischen Änderung kann den zweckmäßigen Einsatz oder die erfolgreiche Platzierung auf dem Markt verhindern.

Aus der Projektionsliste lässt sich **Grundtyp 4** mit dem in Abbildung 5-15 dargestellten Ausprägungsprofil ableiten und wie folgt beschreiben:

Grundtyp 4						
Merkmal	Ausprägungen					
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Notwendigkeit der Änderung	Muss-Änderung			Kann-Änderung		
Dringlichkeit	Ad-hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release-Änderung	
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags		Ab dem Verbrauch des Restbestands		Zeitraum eines Auftrags

Abbildung 5-15: Grundtyp 4

Grundtyp 4: „Technische Prozessänderung“

Änderungsgegenstand: Die technische Änderung wird durch die notwendige Modifikation am Prozess ausgelöst, die Mängel über ein akzeptables Maß hinaus vorweisen oder gesetzliche Richtlinien und Normen nicht erfüllen. Die Änderung betrifft den Ablauf und die Aktivitäten zur Fertigung und Montage des Produkts, zum Einsatz von Betriebsmitteln oder zur Dokumentation. Dazugehörige Anpassungen der physikalischen Spezifikation, Funktionsweise, Software, Vorgehensweise oder Information sind zu berücksichtigen. Das Volumen der Produktänderung kann eine Einzelposition oder Produktserie bzw. Produktcharge betreffen.

Eigenschaften: Ein modularer Produktionsprozess besitzt funktional voneinander entkoppelte Abläufe und Aktivitäten mit klar definierten Schnittstellen. Demzufolge sind keine Änderungspropagationen auf weitere Objekte zu erwarten, so dass Abläufe und Aktivitäten einfach zu modifizieren sind. Ein Produktionsprozess mit integraler Architektur weist komplexe Zuordnungen von Abläufen und Aktivitäten und die Verknüpfung der Komponenten untereinander auf. Eine Änderungspropagation auf weitere Objekte ist zu erwarten.

Einflussfaktoren: Die technische Änderung ist aufgrund von Fehlern und Mängeln in der Technik sowie Sicherheit oder zur Einhaltung der gesetzlichen Richtlinien und Normen vorzunehmen. Abhängig vom Kunden sind regionale und internationale Richtlinien stets zu berücksichtigen. Die von der Forschung und Entwicklung angepasste Änderung erfolgt zur nächsten geplanten Freigabe und Veröffentlichung.

Auswirkungen: Fehlerhafte Abläufe und Aktivitäten haben negative Auswirkungen auf die Produktion von Produkten. Das Ignorieren oder Hinauszögern der technischen Änderung kann den geplanten und erfolgreichen Serienanlauf verhindern und sich negativ auf die Qualität der Produktion auswirken. Prozessfehler in der Serienproduktion steigern die Fehlerkosten exponentiell. Grund hierfür sind die infolge der Serienproduktion festgelegten Abläufe an Aktivitäten und die daraus resultierenden Änderungspropagationen.

Aus der Projektionsliste lässt sich **Grundtyp 5** mit dem in Abbildung 5-16 dargestellten Ausprägungsprofil ableiten und wie folgt beschreiben:

Grundtyp 5						
Merkmal	Ausprägungen					
Betroffenes Objekt	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Umfang der Änderung	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Komponente	Dokument
Notwendigkeit der Änderung	Muss-Änderung			Kann-Änderung		
Dringlichkeit	Ad-hoc		Wichtige kurzfristige Änderung		Release-Änderung	
Zeitliche Gültigkeit	Sofort & rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags		Ab dem Verbrauch des Restbestands		Zeitraum eines Auftrags

Abbildung 5-16: Grundtyp 5

Grundtyp 5: „Technische Optimierung“

Änderungsgegenstand: Die technische Änderung wird durch die notwendige Modifikation an einer kundenspezifischen Komponente ausgelöst, um optimierende oder kostenreduzierende Maßnahmen oder gesetzliche Richtlinien und Normen zu erfüllen. Die Modifikation kann sich auf die physikalische Spezifikation, Funktionsweise, Software, Vorgehensweise oder Information der Komponente beziehen. Eine Änderung wirkt sich neben der Komponente auf die dazugehörige Baugruppe aus. Das Volumen der Änderung kann eine Einzelposition oder Produktserie bzw. Produktcharge betreffen.

Eigenschaften: Eine Komponente ist funktional von anderen Komponenten entkoppelt, so dass eine Änderungspropagation auf weitere Objekte nicht zu erwarten ist. Demzufolge ist die Änderung an den Baugruppen und Komponenten einfach durchzuführen.

Einflussfaktoren: Die Änderung wird durch eine technische Optimierung oder kostengünstigere Variante der Komponente ausgelöst. Aufgrund der wirtschaftlichen Vorteile ist die Änderung auf Grundlage der Forschung und Entwicklung kurzfristig umzusetzen.

Auswirkungen: In Betracht kommende technische Änderungen beabsichtigen eine optimierende oder kostenreduzierende Maßnahme und sind auf ihre Notwendigkeit zu prüfen. Die Entscheidung ist abhängig von der Komplexität der Umsetzung in der Entwicklung und der späteren Fertigung und Montage in der Produktion. Das Ignorieren oder Hinauszögern der Änderung hat keinen direkten negativen Einfluss auf das Produkt oder die Produktion. Gleichwohl besteht die Möglichkeit einer Produktverbesserung oder eines wirtschaftlichen Einsparpotenzials.

Nachdem die Grundtypen technischer Änderungen definiert wurden, werden im Folgenden die Aufwands- und Nutzendimensionen von technischen Änderungen ermittelt.

5.3 Aufwands- und Nutzendimensionen von technischen Änderungen

Innerhalb des dritten Teilmodells erfolgt die Bestimmung der Aufwands- und der Nutzendimensionen technischer Änderungen. Hierzu gilt es ein Beschreibungsmodell der zu prognostizierenden Aufwände zu erstellen. Darin müssen die in der Prognose berücksichtigten Aufwände beschrieben und hinsichtlich des unternehmerischen Kontextes eingeordnet werden. Weiterhin gilt es für den Nutzen technischer Änderungen Nutzendimensionen zu beschreiben, welche eine Berechnung des monetären Nutzens einer technischen Änderung ermöglichen. Die Forschungsfrage für das Teilmodell lautete dementsprechend:

Wie können Aufwand und Nutzen technischer Produktänderungen zur Minimierung der Gesamtänderungsaufwände beschrieben werden?

Phase des CRISP-DM-Modells	Vorgehen im dritten Methodikschritt
Datenverständnis	5.3.1 Exkurs: Systemtheorie
	5.3.2 Ermittlung der Systemgrenzen für technische Änderungen
	5.3.3 Ermittlung des Kalkulationsschemas der Aufwände
	5.3.4 Ermittlung der Nutzendimensionen technischer Änderungen

Abbildung 5-17: Übersicht des dritten Teilmodells

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wird zuerst die Systemtheorie als Möglichkeit zur Beschreibung des Unternehmens als soziotechnisches System vorgestellt. Anschließend werden die Systemgrenzen und Partialsysteme zur Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen bestimmt. In diesen Systemgrenzen erfolgt die Detaillierung der Aufwände und des Nutzens.

5.3.1 Exkurs: Systemtheorie

In der Systemtheorie werden die Grundlagen zur Beschreibung der Elemente von Systemen sowie der Verhaltensweisen eines Systems anhand der Beziehungen der Elemente untereinander erklärt. Das Konzept der Systemtheorie wird in der Arbeit von VAN BERTALANFFY³⁷⁷ erläutert. Die Systemtheorie wird dazu verwendet, ingenieurwissenschaftliche Methoden auch in Nachbargebieten einzusetzen.³⁷⁸ Die Untersuchung

³⁷⁷ Vgl. van Bertalanffy (2003), General system theory

³⁷⁸ Vgl. Bruns (1991), Systemtechnik, S. 1

von technischen Änderungen und deren Aufwänden liegt inhaltlich im Grenzbereich zwischen den Ingenieurwissenschaften und den Wirtschaftswissenschaften (vgl. Unterkapitel 1.3). Zweck der Systemtheorie im Kontext dieser Arbeit ist es, die Systemgrenzen für den zu bestimmenden Aufwand und Nutzen von technischen Änderungen zu setzen. Dabei sind alle Objekte innerhalb der Systemgrenzen Gegenstand der Analyse. Objekte außerhalb der Systemgrenzen werden in der Analyse nicht betrachtet.³⁷⁹ Ein System wird als eine Menge von Elementen, welche in Wechselwirkung miteinander stehen, definiert. Neben dem strukturalen Konzept besteht ein System aus einer Vielzahl miteinander in Wechselwirkung stehender (Sub-)Systeme. Bezogen auf ein Unternehmen können Personen, Abteilungen, Produkte etc. genannt werden. Diese können wiederum in eine Hierarchie gebracht werden, wodurch den Systemen Subsysteme zugewiesen werden können. Dabei findet zwischen dem System und Subsystemen häufig ein Austausch statt. Dieser Austausch beinhaltet eine Transformation von einem Systeminput zu einem Systemoutput. Ein Unternehmen bildet dabei ein offenes Gesamtsystem, welches neben der Interaktion innerhalb des Systems auch Interaktion mit seiner Umwelt aufweist. Abgegrenzt wird das System von seiner Umwelt durch die Systemgrenze, welche auch als Unternehmensgrenze bezeichnet werden kann (siehe Abbildung 5-18).³⁸⁰

Im Folgenden wird das Verständnis des Änderungssystems als Subsystem eines übergeordneten Systems angesehen. Nach dieser Definition von WILBERG erfolgt für den Zweck der vorliegenden Arbeit eine Systemdifferenzierung. Dabei ist das Unternehmenssystem als übergeordnet anzusehen und das Änderungssystem als dessen Subsystem.³⁸¹ Analog zum Unternehmen als System erfüllt das Änderungssystem die Anforderungen durch Entsprechung der Systemaspekte nach ROPOHL.³⁸²

³⁷⁹ Vgl. Meyer et al. (2005), Grafische Methoden der Prozessanalyse, S. 57; Schmitz (2015), Gestaltungsmethodik für eine Produktstruktur variantenreicher rotationssymmetrischer Bauteile, S. 78

³⁸⁰ Vgl. Bossel (2004), Systeme, Dynamik, Simulation, S. 36

³⁸¹ Vgl. Wilberg et al. (2015), Supporting the Implementation of Engineering Change Management with the Viable System Model, S. 733

³⁸² Vgl. Ropohl (2009), Allgemeine Technologie eine Systemtheorie der Technik

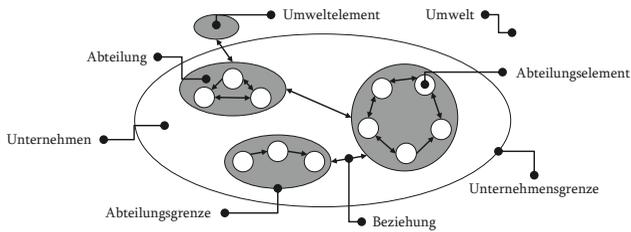


Abbildung 5-18: Grundlagen der Systemtheorie³⁸³

Im folgenden Teilkapitel werden die beschriebenen Grundlagen der Systemtheorie auf das Unternehmenssystem angewendet. Dabei wird das Ziel verfolgt, die durch technische Änderungen induzierten Aufwände abzugrenzen. Elemente, welche nicht innerhalb der hier definierten Systemgrenzen enthalten sind, werden somit nicht bei der Vorhersage der Änderungsaufwände berücksichtigt. Dieses Bewusstsein über die durch die Vorhersage ermittelbaren Kosten ist insbesondere bei der Entscheidungsfindung von Änderungsanträgen zu berücksichtigen.

5.3.2 Beschreibung technischer Änderungen im Sinne der Systemtheorie

Ziel der Anwendung der Systemtheorie im Kontext der vorliegenden Arbeit ist es, zu erklären, welche Elemente des Systems für eine Prognose des Änderungsaufwands und zur Bestimmung des Nutzens von technischen Änderungen zu betrachten sind. Das Unternehmen wird hierbei als soziotechnisches System betrachtet.³⁸⁴ Dieses beschreibt das Zusammenwirken von technischen und sozialen Teilsystemen.³⁸⁵ Das soziale System beinhaltet hierbei Mitglieder und Rollen, während das technische System Aufgaben und Technologien umfasst. Die Übertragung des soziotechnischen Systemansatzes aus der Systemtheorie auf die Produktentwicklung findet bereits Anwendung.³⁸⁶ In der Produktentwicklung wiederum ist auch das technische Änderungsmanagement anzusiedeln (vgl. Unterkapitel 2.2). Dabei wurde bereits gezeigt, dass die Ermittlung der Aufwände bei Produktänderungen komplex ist und mit bestimmten Herausforderungen einhergeht. Die Änderungsaufwände sind dabei zu systematisieren, in einem Kalkulationsschema zu erfassen und anschließend für eine Wirtschaftlichkeitsbewertung

³⁸³ Vgl. Ulrich (2001), Systemorientiertes Management, S. 245

³⁸⁴ Vgl. Ulrich (2001), Systemorientiertes Management, S. 26

³⁸⁵ Vgl. Sommerlatte (2008), Technikgestaltung aus der Sicht des Nutzers, S. 178f.

³⁸⁶ Vgl. Mattern (2018), Steigerung der Kollaborationsproduktivität in der interdisziplinären Produktentwicklung, S. 52

dem zu erwartenden Änderungsnutzen gegenüberzustellen.³⁸⁷ Als Grundlage für die Ermittlung wird der wertmäßige Kostenbegriff eingeführt. Dieser besagt, dass Leistung und Kosten als bewertende, sachzielbezogene Gütererstellung oder bewertender, sachzielbezogener Güterverzehr definiert sind.³⁸⁸ Da es sich bei den Aufwänden von technischen Änderungen um betriebszweckbezogene Aufwände handelt, entsprechen die Aufwände den anfallenden Kosten, welche auch als Zweckaufwand oder Grundkosten bezeichnet werden. Neutrale Aufwände sind im Zuge der Änderungsbewertung zu vernachlässigen, da insbesondere betriebsfremde, periodenfremde und außerordentliche Aufwände bei der Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen keine Rolle spielen können. Zu den Kosten dieser Art kann kein Bezug aus den Änderungsdaten hergestellt werden, weshalb diese nicht in einer datenbasierten Prädiktion vorhanden sein können. Nachfolgend ist somit der Aufwandsbegriff dem Grundkostenbegriff gleichzusetzen.

Zur Ermittlung des Kalkulationsschemas wird die Systemgrenze um das Unternehmen gezogen. Dabei bildet das Unternehmen das Gesamtsystem, welches durch die Geschäftssystemgrenzen von seiner Umwelt abgegrenzt ist.³⁸⁹ Die unterschiedlichen Beteiligten an diesen Geschäftsprozessen sind hierbei als Subsysteme (Abteilungen) zu verstehen, welche in Beziehung zueinander stehen. Da technische Änderungen über den gesamten Produktlebenszyklus auftreten und Aufwand verursachen können, sind bei der Gestaltung des Kalkulationsschemas alle Subsysteme zu betrachten. Die Bearbeitung von technischen Änderungen erfolgt i.d.R. arbeitsteilig und erfordert unterschiedliche Fähigkeiten und Ressourcen, so dass davon ausgegangen werden kann, dass mehrere Subsysteme bei der Bearbeitung involviert sind.³⁹⁰ Die in den Subsystemen anfallenden Aktivitäten stehen dabei in einer Input-Output-Relation zueinander. Damit können die Aktivitäten als Systemelemente definiert werden, welche in einem Informationsfluss untereinander stehen. Weiterhin kann den anfallenden Aktivitäten ein Ressourcenverzehr zugeordnet werden. Die Summe des auftretenden Ressourcenverzehrs wiederum bildet die anfallenden Änderungsaufwände. Diese können auf Grundlage der prozessorientierten Kostenrechnung sowie der Kostenstellenrechnung

³⁸⁷ Vgl. Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 85

³⁸⁸ Vgl. Schmalenbach (1963), Kostenrechnung und Preispolitik, S. 6

³⁸⁹ Vgl. Korthals (2014), Wertstromanalyse in der Produktentwicklung, S. 26

³⁹⁰ Vgl. Zanner (2002), Management inkrementeller Dienstleistungsinnovation, S. 55; Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 86; Alblas et al. (2012), Managing large engineering changes, S. 1252f.

in ihren unterschiedlichen Leistungsbereichen erfasst werden. Der Begriff Kostenstellen ist dabei dem Begriff Leistungsbereiche gleichzusetzen. Diese Leistungsbereiche orientieren sich an den organisatorischen Gegebenheiten.³⁹¹

Die Leistungsbereiche eines produzierenden Unternehmens können je nach Aufbauorganisation unterschiedlich strukturiert sein. Im Folgenden wird eine Möglichkeit zu deren Strukturierung beschrieben. Dies erfolgt, damit die Änderungsaufwände je Leistungsbereich prognostiziert werden können. Hierdurch können anfallende Aufwände innerhalb der einzelnen Leistungsbereiche addiert werden, so dass die gesamten Aufwände je Leistungsbereich für eine technische Änderung quantifiziert sind. Die Zuordnung der Aufwände je Leistungsbereich ist dabei für die nachfolgende Prognose notwendig, so dass je Leistungsbereich und Änderungstyp die entsprechenden Aufwände vorhergesagt werden können. Diese Detaillierung unterstützt die anschließende Minimierung der Gesamtänderungsaufwände (vgl. Unterkapitel 5.5). Die Strukturierung der Leistungsbereiche erfolgt in Orientierung an der Funktionalorganisation, welche die älteste, aber auch heute noch verbreitetste Organisationsstruktur darstellt.³⁹² Hierzu werden die Leistungsbereiche Entwicklung, Einkauf, Produktion, Qualitätssicherung, Vertrieb, Service und Änderungswesen unterschieden. Eine detailliertere Unterscheidung ist möglich, bietet jedoch im Zuge der vorliegenden Arbeit keinen Mehrwert, da sie die Komplexität des Vorhabens erhöht, jedoch kein zusätzlicher Informationsgewinn zu erwarten ist.

Als Schlussfolgerung kann festgehalten werden, dass den relevanten Systemelementen der Ressourcenverzehr durch änderungsinduzierte Aufwände zugewiesen werden muss, damit diese durch das Prognosemodell für neue technische Änderungsanfragen vorhergesagt werden können. Die Grundlage einer Prognose sind hierbei immer historische Daten, welche im zu definierenden Kalkulationsschema zu erfassen sind. Im folgenden Teilkapitel erfolgt die Strukturierung der Leistungsbereiche zur Zuordnung änderungsinduzierter Aufwände.

5.3.3 Ermittlung der Änderungsaufwände je Leistungsbereich

Nach der Strukturierung der Leistungsbereiche ist es das Ziel des folgenden Arbeitsschrittes, zunächst die anfallenden prozessorientierten Änderungsaufwände zu definieren, bevor diese den Leistungsbereichen zugeordnet werden. Änderungsaufwände

³⁹¹ Vgl. Horngren et al. (2000), Cost accounting, S. 48

³⁹² Vgl. Frese et al. (2019), Grundlagen der Organisation, S. 166f.

sind dabei als bewerteter, produktänderungsprojektbezogener Güterverzehr zu verstehen.³⁹³ Zur Kalkulation der Aufwände wird auf die allgemeine Kostenkalkulation zurückgegriffen. Hierbei ist die Ermittlung von Herstell- oder Selbstkosten einer Mengeneinheit eines Kostenträgers gemeint, wobei die Herstellkosten Material- und Fertigungskosten beinhalten und die Selbstkosten zusätzlich die Entwicklungs-, Verwaltungs- und Vertriebskosten anteilig berücksichtigen.³⁹⁴ Als Mengeneinheit eines Kostenträgers ist dabei eine technische Änderung anzusehen.

Der Prozess einer technischen Änderung (vgl. Teilkapitel 2.2.2) und die durch die technische Änderung entstehenden Kosten werden in unterschiedlichen Kategorien beschrieben. Ausgehend von einem Änderungsprozess können Änderungsaufwände als *Prozesskosten des Änderungsvorlaufs*, *Prozesskosten der Änderungsdurchführung*, *Folgekosten des Änderungsvorlaufs*, *Folgekosten der Änderungsdurchführung* sowie *unternehmensübergreifende Änderungsfolgekosten* beschrieben werden.³⁹⁵ Im Folgenden werden die innerhalb der Kategorien anfallenden Kostenpositionen beschrieben und anschließend den Leistungsbereichen zugeordnet.

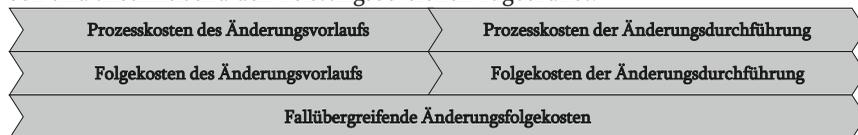


Abbildung 5-19: Prozessorientierte Systematisierung von Änderungskosten³⁹⁶

Unter den *Prozesskosten des Änderungsvorlaufs* werden die Kosten verstanden, welche entstehen, bevor eine technische Änderung umgesetzt werden kann. Demnach sind hier die Kosten zusammengefasst, die im Zeitraum zwischen der Erkennung des Änderungsbedarfs und der Entscheidung über die Änderungsdurchführung anfallen. Die Höhe dieser Kosten ist i.d.R. nicht unerheblich und wird in vielen Unternehmen unterschätzt, weil sie für jeden Änderungsantrag anfallen, und zwar auch für die, die nicht genehmigt werden. Dabei können diese Kosten in unterschiedlichen Leistungsbereichen der Unternehmen anfallen. Durch die in vielen Unternehmen etablierte „Änderungskultur“, bspw. durch ein ausgeprägtes Vorschlagwesen zur Verbesserung von Produkten und Prozessen, ergeben sich in Summe relativ viele Änderungsanträge,

³⁹³ Vgl. Gebhardt (2018), Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen, S. 41; Schultz (1995), Projektkostenschätzung, S. 16

³⁹⁴ Vgl. Friedl et al. (2017), Kostenrechnung, S. 74

³⁹⁵ Vgl. Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 146ff.; Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 88ff.; Gebhardt (2018), Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen, S. 42

³⁹⁶ Vgl. Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 147

wobei jeder Änderungsantrag mit gewissen Vorlaufkosten einhergeht.³⁹⁷ Dabei verursachen insbesondere solche Änderungen Vorlaufkosten, welche nachfolgend nicht umgesetzt werden. Die Kosten des Änderungsvorlaufs sind daher in jedem Fall bei der Bewertung technischer Änderungen zu berücksichtigen, jedoch im Vergleich zu den Kosten der Änderungsdurchführung i.d.R. in geringerem Maße.³⁹⁸

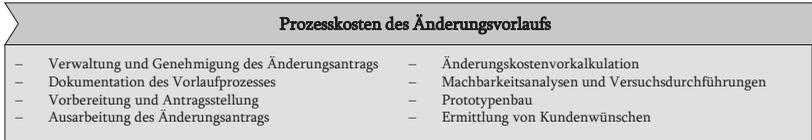


Abbildung 5-20: Prozesskosten des Änderungsvorlaufs

Unter den *Folgekosten des Änderungsvorlaufs* werden die Kosten verstanden, die insbesondere dann auftreten, wenn die technische Änderung in der laufenden Produktion auftritt. Die Folgekosten des Änderungsvorlaufs gelten als schwierig zu quantifizieren. Sie treten auf, wenn sich eine technische Änderung in der Überprüfung befindet, also bevor diese umgesetzt wird. Dabei kommt es besonders bei fehlerbedingten Änderungen dazu, dass die Produktion der betroffenen Einheit unterbrochen wird, bis die Prüfung abgeschlossen ist, um mögliche zusätzliche Kosten für die Nacharbeit der Produkte zu vermeiden. Gleichzeitig sorgt dieser Produktionsstopp dafür, dass entweder Fertigungsmaschinen blockiert werden oder zusätzliche Rüstvorgänge zur Bearbeitung eines anderen Bauteils nötig sind. Die Koordination der Maschinenbelegungen übernimmt die Fertigungssteuerung, bei der somit zusätzlicher Arbeitsaufwand entsteht. Häufig werden betroffene Bauteile, deren Änderung geprüft wird, in einem Sperrlager zwischengelagert. Sowohl die Erhaltung des Lagers als auch die Vorgänge des Ein- und Auslagerns verursachen Kosten für die Logistik.³⁹⁹ Diese Kosten fallen dabei nicht bei der Durchführung einer technischen Änderung an, sondern während des Vorlaufs.

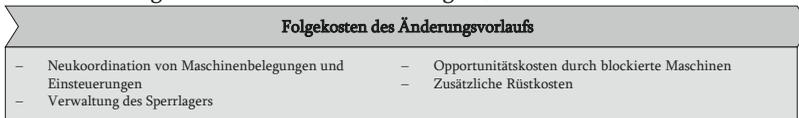


Abbildung 5-21: Folgekosten des Änderungsvorlaufs

³⁹⁷ Vgl. Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 149ff.

³⁹⁸ Vgl. Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 121ff.

³⁹⁹ Vgl. Conrat Niernerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 151

Unter den *Prozesskosten der Änderungsdurchführung* werden die Kosten, die unmittelbar bei der Umsetzung der technischen Änderung entstehen, zusammengefasst. Dabei handelt es sich um Kosten, die meist auf den ersten Blick wahrgenommen werden, da sie in einer sehr engen Beziehung zum zu ändernden Objekt stehen. In der Entwicklung und Konstruktion werden zur Implementierung der Änderung sämtliche Primärdokumente angepasst. Dabei handelt es sich um technische Einzelteilzeichnungen, Gesamtzeichnungen und Stücklisten für die Fertigung. Auch bei der Änderungsdurchführung können noch Berechnungen, Simulationen oder Versuche nötig sein, für die ähnlich wie in der Vorlaufphase Kosten anfallen. Sind die Änderungen an allen Dokumenten abgeschlossen, werden die durch das Änderungswesen verwalteten und erstellten Änderungsaufträge an die beteiligten Leistungsbereiche weitergeleitet. Testläufe und Vorserien des geänderten Produkts werden in der Produktion von der Entwicklung begleitet und dokumentiert. Neben den Primärdokumenten müssen auch sekundäre Dokumente in sämtlichen Abteilungen angepasst werden. Die Arbeitsvorbereitung muss Arbeitspläne, die Qualitätssicherung Prüfpläne und der Service die Wartungspläne der geänderten Produkte anpassen. Bei der Arbeitsvorbereitung entstehen außerdem Kosten für die Änderung von Programmierungen (bspw. von CNC-Maschinen) sowie für die Herstellung neuer Werkzeuge, Vorrichtungen oder Messmittel, falls diese für die Produktion des geänderten Bauteils nötig sind.

Prozesskosten der Änderungsdurchführung	
– Koordination und Überwachung	– Dokumentation von Test- und Serienanläufen
– Programmierung und Software	– Mitarbeitererweisungen / Schulungen
– Betriebsmittelkosten	– Nacharbeitskosten
– Änderungskosten für Sekundärdokumente	– Kosten durch Ausschuss
– Änderungskostenkalkulation	– Produktivitätsverluste
– Lieferantenprüfung	– Abnahme- / Erstmuster- / Qualitätsprüfungen
– Lieferantenwechsel	– Rückrufaktionen und Außendienst
– Änderungskosten für Primärdokumente	– Schulungskosten
– Simulations- und Versuchskosten	– Kosten durch Kundeninformation
– Prototypenbau	

Abbildung 5-22: Prozesskosten der Änderungsdurchführung

Unter den *Folgekosten der Änderungsdurchführung* werden die Kosten verstanden, welche nach der Änderungsimplementierung dem geänderten Objekt zugeordnet werden können. Werden Änderungen an einem Objekt vollzogen, können weitere Folgen der Änderung auftreten. Hierzu gehören bspw. Bauteilversuche (z. B. Lebensdauerversuche) sowie bereits durchgeführte Funktionsoptimierungen und Endabnahmen.⁴⁰⁰ Diese Aufwände sind den Änderungskosten zuzurechnen. Damit die Qualität der produzierten Produkte erhalten bleibt, werden durch die Qualitätssicherung speziell in

⁴⁰⁰ Vgl. Conrat Niemerg (1997), Änderungskosten in der Produktentwicklung, S. 157

der Produktionsphase kurz nach Änderungsdurchführung vermehrt Prüfungen und Qualitätsaudits durchgeführt. Eine weitere große Kostenauswirkung ist die Wertminderung von bereits produzierten, aber noch nicht verkauften Produkten. Diese sind auf dem technischen Stand vor der Änderungsimplementierung und müssen somit je nach Änderungsursache nachgearbeitet werden. Ist dies nicht möglich, müssen sie im schlimmsten Fall verschrottet werden.

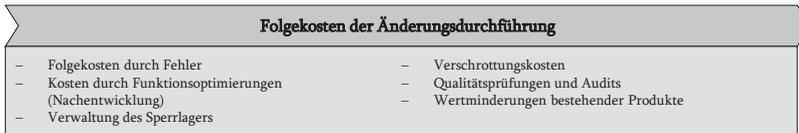


Abbildung 5-23: Folgekosten der Änderungsdurchführung

Abschließend werden die *fallübergreifenden Änderungsfolgekosten* beschrieben. Diese Kosten können nicht mehr den einzelnen Leistungsbereichen eines Unternehmens zugeordnet werden. Grundsätzlich wird hier zwischen laufenden Kosten und Opportunitätskosten unterschieden. Die laufenden Kosten eines Unternehmens werden aufgrund der Variantenbildung durch technische Änderungen beeinflusst. In diesem Zusammenhang entstehen Komplexitätskosten im Unternehmen. Opportunitätskosten wiederum beschreiben sowohl entgangene Absatzmöglichkeiten am Markt durch eine verlängerte Time-to-Market als auch Kosten durch Imageverluste aufgrund von Produktfehlern. Unternehmensübergreifende Kosten sind daher sehr speziell hinsichtlich der technischen Änderung, des Unternehmens, der Produkte und der gegebenen Marktsituation. In dieser Arbeit werden die *fallübergreifenden Änderungsfolgekosten* bei der Prognose der Änderungskosten nicht berücksichtigt. Eine Verknüpfung der Änderungsdaten mit diesen Kosten ist dabei nicht zielführend. Diese Art von Kosten ist sehr fallspezifisch und kann nicht mittels Vergangenheitsdaten ermittelt werden, so dass eine Prognose dieser Aufwände nicht sinnvoll ist (vgl. Teilkapitel 5.3.2). Eine Berücksichtigung der Aufwände sollte jedoch fallspezifisch bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer Änderung berücksichtigt werden.

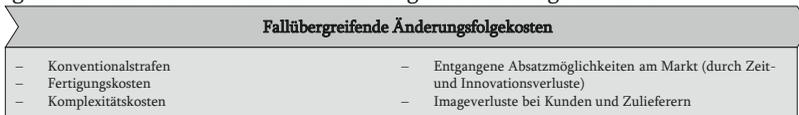


Abbildung 5-24: Fallübergreifende Änderungsfolgekosten

Entsprechend der Leistungsbereiche und der prozessorientierten Zuordnung von Änderungskosten kann das in Abbildung 5-25 dargestellte Kalkulationsschema zur Kostenverteilung technischer Änderungen zugrunde gelegt werden. Hierbei sind lediglich die vorhersagbaren Kosten dargestellt.

	Prozesskosten des Änderungsvorlaufs	Folgekosten des Änderungsvorlaufs	Prozesskosten der Änderungsdurchführung	Folgekosten der Änderungsdurchführung
Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> - Machbarkeitsanalysen und Versuchsdurchführungen - Prototypenbau 		<ul style="list-style-type: none"> - Änderungskosten für Primärdokumente - Simulations- und Versuchskosten - Prototypenbau - Dokumentation von Test- und Serienanläufen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kosten durch Funktionsoptimierungen (Nachentwicklung)
Ein Kauf			<ul style="list-style-type: none"> - Lieferantenprüfung - Lieferantenwechsel 	
Produktion		<ul style="list-style-type: none"> - Opportunitätskosten durch blockierte Maschinen - Zusätzliche Rüstkosten - Verwaltung des Sperrlagers - Neuordnung von Maschinenbelegungen und Einsteuerungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Mitarbeitereinweisungen / Schulungen - Nacharbeitkosten - Kosten durch Ausschuss - Produktivitätsverluste - Programmierung und Software - Betriebsmittelkosten 	<ul style="list-style-type: none"> - Verwaltung des Sperrlagers - Verschrottungskosten
Qualitätssicherung			<ul style="list-style-type: none"> - Abnahmemuster/ Erstmuster - Qualitätsprüfungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Qualitätsprüfungen - Audits
Vertrieb	<ul style="list-style-type: none"> - Ermittlung von Kundenwünschen 		<ul style="list-style-type: none"> - Kosten durch Kundeninformation 	<ul style="list-style-type: none"> - Wertminderungen bestehender Produkte
Service			<ul style="list-style-type: none"> - Rückrufaktionen und Außendienst - Schulungskosten 	
Änderungswesen	<ul style="list-style-type: none"> - Verwaltung und Genehmigung des Änderungsantrags - Dokumentation des Vorlaufprozesses - Vorbereitung und Antragsstellung - Ausarbeitung des Änderungsantrags - Änderungskosten-vorkalkulation 		<ul style="list-style-type: none"> - Koordination und Überwachung - Änderungskosten für Sekundärdokumente - Änderungskosten-kalkulation 	

Abbildung 5-25: Zuordnung von Prozesskosten zu Leistungsbereichen

Nachdem die Zuordnung der Änderungskosten zu den definierten Leistungsbereichen erfolgt ist, besteht die Grundlage für die Kostenerfassung technischer Änderungen. Dabei kann die Bewertung technischer Änderung mittels prädiktiver Datenanalyse selbst einen Beitrag leisten, insbesondere die Kosten des Änderungsvorlaufs durch eine schnellere Entscheidungsfindung zu reduzieren. Um eine technische Änderung hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten, folgt im nächsten Teilkapitel eine Beschreibung der Nutzendimensionen von technischen Änderungen welche den Kosten gegenübergestellt werden muss.

5.3.4 Ermittlung der Nutzendimensionen technischer Änderungen

Nachdem im vorherigen Teilkapitel die Leistungsbereiche strukturiert und die Änderungskosten den Leistungsbereichen zugewiesen wurden, erfolgt im nächsten Schritt die Beschreibung des Nutzens technischer Änderungen. Durch das Prozessmodell ist eine detaillierte Erfassung von Änderungskosten problemlos möglich. Demgegenüber ist die Abschätzung des resultierenden Nutzens zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit nicht hinreichend untersucht.⁴⁰¹

Änderungen werden als wirtschaftlich erachtet, wenn ihr Änderungsnutzen größer als die Kosten ihrer Durchführung ist.⁴⁰² Eine Nutzenbetrachtung sollte dabei insbesondere bei neuerungsbedingten Änderungen wie bspw. Rationalisierungen oder Produktinnovationen durchgeführt werden.⁴⁰³ Eine Nutzensteigerung durch Kostensenkungen im Lebenszyklus aufgrund gesunkener Servicekosten wird bislang nahezu vollständig vernachlässigt oder nur am Rande im Zusammenhang der Qualitätskostentheorie angesprochen.⁴⁰⁴ Die Betrachtung dieser Nutzendimensionen ist im Zuge der Arbeit als nicht ausreichend zu beurteilen. Vielmehr soll der monetär quantifizierbare Nutzen, welcher aufgrund einer durchzuführenden Änderung entsteht, beschrieben werden. Nur so kann eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt werden, bei der Aufwände und Nutzen gegenübergestellt werden. In Anlehnung an den in Kapitel 5.3.3 definierten Aufwandsbegriff im Kontext von technischen Änderungen wird nachfolgend der Nutzenbegriff im Kontext technischer Änderungen festgelegt.

Der Nutzen einer technischen Änderung wird im Zuge dieser Arbeit als Ertrag angesehen. Dieser ist als erfolgswirksame Einnahme über einen periodisierten Zeitrahmen definiert.⁴⁰⁵ Als Periode ist dabei die Dauer anzunehmen, in welcher Auswirkungen einer technischen Änderung wirksam sind. Basierend auf dieser Definition müssen nachfolgend die verschiedenen Nutzendimensionen bestimmt werden, welche zu erfolgswirksamen Einnahmen aufgrund von technischen Änderungen führen können. Dabei kann die prozessorientierte Systematisierung von Änderungskosten als Ausgangspunkt der Nutzenbetrachtung gewählt werden. In Analogie zu den Kosten ist dabei festzustellen, dass ein Änderungsnutzen nur als „Folgenutzen der Änderungsdurchführung“ vorliegen kann. Dabei können zwei Dimensionen des Nutzens unterschieden werden. Zum einen können durch technische Änderungen die Herstellkosten eines Produktes durch eine Produkt- oder Prozessverbesserung reduziert werden.

⁴⁰¹ Vgl. Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 90

⁴⁰² Vgl. Gemmerich (1995), Technische Produktänderungen, S. 39

⁴⁰³ Vgl. Belener (2008), Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse, S. 53

⁴⁰⁴ Vgl. Gille (2013), Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, S. 90

⁴⁰⁵ Vgl. Lachnit et al. (2012), Unternehmenscontrolling: Managementunterstützung bei Erfolgs-, Finanz-, Risiko- und Erfolgspotenzialsteuerung // Unternehmenscontrolling, S. 51

Zum anderen kann der Umsatzerlös eines Produktes gesteigert werden, indem beim Kunden zusätzliche Zahlungsbereitschaft geschaffen wird.

Bei der Reduktion der Herstellkosten durch technische Änderungen ist eine Betrachtung der *Herstellkosten 1* sinnvoll. Diese setzen sich aus den vorhandenen Materialkosten sowie den Fertigungskosten eines Produktes zusammen.⁴⁰⁶ Materialkosten können dabei in Materialeinzelkosten und Materialgemeinkosten aufgeteilt werden. Den Fertigungskosten wiederum sind Fertigungseinzelkosten, Fertigungsgemeinkosten und Sondereinzelkosten der Fertigung zuzuordnen (siehe Abbildung 5-26).⁴⁰⁷ Den *Herstellkosten 2* hingegen werden weiterhin die Entwicklungs- und Konstruktionskosten zugewiesen. Generell können technische Änderungen zur Reduktion aber auch Steigerung von Herstellkosten 1 und Herstellkosten 2 führen.

Materialeinzelkosten	Materialkosten	Herstellkosten 1	Herstellkosten 2
Materialgemeinkosten			
Fertigungseinzelkosten	Fertigungskosten		
Fertigungsgemeinkosten			
Sondereinzelkosten der Fertigung			
Entwicklungskosten			
Konstruktionskosten			

Abbildung 5-26: Zusammensetzung von Herstellkosten

Zusammenfassend kann die Reduktion der Herstellkosten daher als Summe der Reduktion der Material- und Fertigungskosten dargestellt werden:

Formel 3: Veränderung der Herstellkosten

$$\Delta HK = \sum_k ((MK_i)_t - (MK_i)_{t+1} + (FK_i)_t - (FK_i)_{t+1})$$

mit

MK_i Materialkosten der Änderung i

FK_i Fertigungskosten der Änderung i

t Zeitpunkt vor der Änderung

$t + 1$ Zeitpunkt nach der Änderung

⁴⁰⁶ Vgl. Schroeter (2002), Operatives Controlling, S. 163f.

⁴⁰⁷ Vgl. Bronner (1996), Angebots- und Projektkalkulationen, S. 9f.

Neben der Reduktion der Herstellkosten kann der Nutzen von technischen Änderungen durch die Erhöhung des Umsatzerlöses generiert werden. Der Umsatzerlös beschreibt dabei einen Geldwert, der durch den Verkauf eines Produktes erzielt wird, ohne die dabei anfallenden Kosten zu berücksichtigen. In Bezug auf technische Änderungen wird diese Gegenüberstellung im Zuge der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Kapitel 5.5 durchgeführt. Für den Nutzen ist lediglich die Differenz des Umsatzerlöses vor und nach einer technischen Änderung relevant. Die Differenz des Umsatzerlöses ist dabei definiert als:

Formel 4: Veränderung des Umsatzerlöses

$$\Delta UE = \sum_k ((UE_i)_{t+1} - (UE_i)_t)$$

mit

UE_i Umsatzerlös des von Änderung i betroffenen Produkt

t Zeitpunkt vor der Änderung

$t + 1$ Zeitpunkt nach der Änderung

Wobei der Umsatzerlös selbst definiert ist als:

Formel 5: Umsatzerlös

$$UE = P * p$$

mit

P Anzahl der Produkte oder der Dienstleistungen

p Marktpreis

Folglich kann der Nutzen als Summe des gesteigerten Umsatzerlöses und der Reduktion der Herstellkosten zusammengefasst werden:

Formel 6: Nutzen einer technischen Änderung

$$\text{Nutzen } T\ddot{A}_i = \Delta HK_i + \Delta UE_i$$

mit

ΔHK_i Einsparung der Herstellkosten durch Änderung i

ΔUE_i Steigerung des Umsatzerlöses durch Änderung i

Nachdem in Unterkapitel 5.3 die Dimensionen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit technischer Änderungen ermittelt wurden, folgt im Unterkapitel 5.4 die Ermittlung der Änderungsaufwände mittels Random-Forest-Algorithmus.

5.4 Aufwandsabschätzung für technische Änderungen mittels Random Forest

Innerhalb des vierten Teilmodells erfolgt die Entwicklung des Prädiktionsmodells zur Aufwandsabschätzung technischer Änderungen. Dabei wird auf die Erkenntnisse der vorherigen Kapitel zurückgegriffen. Der Random-Forest-Algorithmus wurde in Teilkapitel 2.4.3 bereits allgemein beschrieben. Hier ist das Ergebnis einer Vorhersage durch den Algorithmus als Zielvariable definiert. Im Kontext dieser Arbeit ist die Zielvariable der Aufwand einer technischen Änderung. Um diesen Aufwand vorherzusagen, werden zuvor dem CRISP-DM entsprechend verschiedene Schritte durchlaufen (siehe Abbildung 5-27). Die Forschungsfrage für das Teilmodell lautete dementsprechend:

Wie können die Zusammenhänge zwischen Beschreibung und Grundtypen technischer Produktänderungen und deren Aufwand ermittelt werden?

Phase des CRISP-DM-Modells	Vorgehen im vierten Methodikschritt
Datenvorbereitung	5.4.1 Datenvorbereitung für das Prädiktionsmodell
Modellierung	5.4.2 Aufbau des Prädiktionsmodells
Evaluation	5.4.3 Evaluation der Ergebnisse und Optimierung des Prädiktionsmodells

Abbildung 5-27: Übersicht des vierten Teilmodells

5.4.1 Datenvorbereitung für das Prädiktionsmodell

Zu Beginn müssen die Daten zur Verwendung durch den Random-Forest-Algorithmus vorbereitet werden. Die Datenvorbereitung stellt entsprechend des CRISP-DM (vgl. Teilkapitel 2.3.2) den größten Aufwand in dar. Die notwendigen Schritte sind dabei das Identifizieren, Auswählen und Extrahieren der Daten aus den IT-Systemen. Anschließend gilt es diese Daten zu bereinigen und aufzubereiten, so dass sie für den Random-Forest-Algorithmus nutzbar sind. Hierzu gehören das Bearbeiten und Entfernen von fehlenden und inkorrekten Daten. Das Ziel der Datenvorbereitung ist es, eine valide Datenbasis für das Trainieren des Random-Forest-Algorithmus zu erzeugen.

Ähnlichkeitsmaß für Mengen, Elemente und Vektoren geeignet ist.⁴⁰⁹ Dabei wird eine technische Änderung dem Grundtyp zugewiesen, welcher den höheren Jaccard-Koeffizienten aufweist. Je näher der Wert dabei an 1 liegt, desto ähnlicher sind sich die beiden Elemente. Der minimale Wert des Jaccard-Koeffizienten ist 0.

Der Jaccard-Koeffizient ist definiert als:

Formel 7: Jaccard-Koeffizient

$$J(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}$$

mit

A Merkmalsausprägungen einer technischen Änderung

B Merkmalsausprägungen eines Grundtyps technischer Änderungen

\cap Anzahl gleicher Merkmalsausprägungen

\cup Anzahl aller Merkmalsausprägungen

Ausprägung der technischen Änderungen				Jaccard-Koeffizient	
ID	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3	Grundtyp 1	Grundtyp 2
1	A	B	C	2/3	1/3
2	A	C	C	1	0
3	B	B	A	0	1

=
≠
=

Ausprägung der Grundtypen			
Grundtyp	Ausprägung 1	Ausprägung 2	Ausprägung 3
1	A	C	C
2	C	B	B

Abbildung 5-29: Vereinfachtes Beispiel für die Anwendung des Jaccard-Koeffizienten

Nach der Zuweisung können der Grundtyp der technischen Änderung sowie die typenbeschreibenden Merkmale einer Änderung als Eingangsdaten in tabellarischer

⁴⁰⁹ Vgl. Eckey (2002), Multivariate Statistik, S. 221f.

Form abgespeichert werden, damit diese durch den Random-Forest-Algorithmus genutzt werden.

Das zentrale Element der entwickelten Methodik besteht in der Bewertung der technischen Änderungen hinsichtlich des Nutzens und des Aufwands, die mit der Umsetzung der Änderungen einhergehen würden. Die Bestimmung des Nutzens erfolgt, wie in Teilkapitel 5.3.4 beschrieben, anhand von Expertenworkshops in zwei Dimensionen. Einerseits wird die mögliche Reduktion der Herstellkosten durch die Umsetzung einer technischen Änderung bewertet, was zu einer gesamtheitlichen Kostenreduktion für das entsprechende Produkt führen und somit die Wirtschaftlichkeit erhöhen würde. Weiterhin wird die mögliche Steigerung des Umsatzerlöses bestimmt, welche ebenfalls zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit führt. Die Summe dieser beiden Faktoren ergibt den Gesamtnutzen für die Umsetzung einer technischen Änderung.

Die Ermittlung des Aufwands erfolgt anhand des in Unterkapitel 5.4 entwickelten Verfahrens mittels prädiktiver Datenanalyse. Hierfür muss in einem ersten Schritt das Prädiktionsmodell mit Vergangenheitsdaten trainiert werden. Die Vergangenheitsdaten müssen hierfür in strukturierter Form, bspw. in einer Änderungsdatenbank, vorliegen und zur Verfügung stehen. In der Änderungsdatenbank sind alle vergangenen Änderungen und ihre dazugehörigen Informationen gespeichert. Hierzu gehören die ID, der bereits beschriebene Grundtyp und die entsprechenden typenbeschreibenden Merkmale mit ihren Ausprägungen, die Aufwände in den einzelnen Leistungsbereichen und der Gesamtänderungsaufwand, welcher sich aus der Summe der Einzelaufwände ergibt. Die ID ist dabei eine fortlaufende Nummer der Änderungsanträge und dient der eindeutigen Identifizierung einer technischen Änderung. Die Grundtypen bilden einen Teil der Inputvariablen, da für diese ein wesentlicher Einfluss hinsichtlich der Aufwände von technischen Änderungen anzunehmen ist. Die typenbeschreibenden Merkmale dienen ebenfalls als Inputvariablen zur Prognose der Änderungsaufwände, da durch diese eine weitere Detaillierung der Änderungsaufwände anzunehmen ist. Die Änderungsaufwände je Leistungsbereich wiederum stellen die Zielvariable dar. Dabei ist es insbesondere von den vorhandenen Unternehmensdaten abhängig, in welchem Detailgrad die Unterscheidung der Kosten nach Leistungsbereichen ermöglicht wird. Anzustreben ist der in Unterkapitel 5.3 entwickelte Detailgrad. Dieser ermöglicht die in Unterkapitel 5.5 beschriebene Minimierung der Gesamtänderungsaufwände bei gleichzeitiger Beherrschbarkeit der notwendigen Ressourcen zur Aufwandsermittlung.

Ein beispielhaftes Datenset bestehend aus den Vergangenheitsdaten ist in Abbildung 5-30 dargestellt und kann so für das Trainieren des Prädiktionsmodells verwendet werden.

Informationen		Merkmale				Aufwände			Nutzen	
ID	Grundtyp	Änderungsvolumen	Betroffene Objektspezifikation	Betroffenes Objekt	...	Entwicklung	Produktion	...	Herstellkosten	...
21	Technische Produktänderung	Produktserie	Funktionsweise	Produkt		2.500 €	4.100 €		- 200 €	
23	Technische Produktänderung	Produktcharge	Software	Betriebsmittel		2.000 €	5.600 €		-50 €	
35	Kundenspezifische technische Änderung	Produktserie	Funktionsweise	Baugruppe	...	22.500 €	2.400 €	...	0 €	...
43	Technische Prozessänderung	Einzelposition	Informationen	Prozess		11.500 €	0 €		- 1.500 €	
47	Kundenspezifische technische Änderung	Produktportfolio	Funktionsweise	Baugruppe		6.500 €	200 €		- 650 €	

Abbildung 5-30: Tabellarische Darstellung der vorbereiteten Datenbasis

Mittels statistischer Auswertung kann die Datenbasis anschließend analysiert werden, um eine valide Datenbasis zum Trainieren des Random-Forest-Algorithmus sicherzustellen. Dabei sind bei kategorischen Daten insbesondere die Verteilungen der Merkmalsausprägungen und der Grundtypen von Interesse.⁴¹⁰ Es gilt, dass eine gleichmäßigere Verteilung der Daten zu allgemein besseren Prognoseergebnissen führt. Anhand der statistischen Auswertungen ist die Repräsentativität der Daten hinsichtlich der Problemstellung zu bewerten. Eine Prognose ist dabei immer nur für Informationen möglich, welche in der Datenbasis vorhanden sind.⁴¹¹ Angewendet auf die Bewertung der Aufwände technischer Änderungen bedeutet dies, dass eine Prognose für nicht in den Änderungsdaten enthaltene Fälle von technischen Änderungen keine gute Prognosegüte aufweist. Zusammenfassend ist somit neben einer hohen Anzahl an Daten insbesondere eine gute Verteilung der Daten anzustreben.

Abschließend ist eine Transformation der Daten durchzuführen. Diese ist notwendig, damit ein Random-Forest-Algorithmus die kategorischen Daten verarbeiten kann. Diese Transformation wird als *One-hot-Encoding* bezeichnet. Dabei werden die kategorischen Daten in eine numerische Repräsentation überführt. Da es sich bei den kategorischen Daten um eine nominale Skala handelt, können bei der Überführung keine Zahlen, welche in eine Reihenfolge zueinander gebracht werden können, verwendet werden. Hierbei würde es zu einer Verzerrung der Ergebnisse kommen, da höhere

⁴¹⁰ Vgl. Sauer mann (2020), Datenbasierte Prognose und Planung auftragsspezifischer Übergangszeiten, S. 117f.

⁴¹¹ Vgl. Kühnapfel (2019), Die Macht der Vorhersage, S. 47f.

Werte anders gewichtet würden als niedrige. Stattdessen wird eine Matrix mit einer binären Repräsentation der Daten erstellt.

ID	Änderungstyp
1	Technische Produktänderung
2	Technische Betriebsmitteländerung
3	Kundenspezifische technische Änderung
4	Technische Prozessänderung
5	Technische Optimierung

ID	Änderungs- typ 1	Änderungs- typ 2	Änderungs- typ 3	Änderungs- typ 4	Änderungs- typ 5
1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0
3	0	0	1	0	0
4	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1

Abbildung 5-31: Beispiel des One-hot-Encoding anhand der Änderungstypen

Nachdem das Vorgehen zur Datenvorbereitung beschrieben ist, folgt die Darlegung des Vorgehens zum Aufbau und Trainieren des Modells.

5.4.2 Aufbau des Prädiktionsmodells

Im vorherigen Teilkapitel wurde das Vorgehen der Datenvorbereitung zur Bewertung technischer Änderungen mittels Random-Forest-Algorithmus beschrieben. Die Datengrundlage, welche nach diesem Schritt zur Verfügung steht, kann anschließend zum Trainieren des Random-Forest-Algorithmus genutzt werden. Dafür werden die unterschiedlichen Parameter des Random-Forest-Algorithmus festgelegt. Im Folgenden werden diese Eigenschaften im Kontext der Problembeschreibung, also der Vorhersage von Änderungsaufwänden (ordinale Daten) auf Basis von Änderungstypen und typenbeschreibenden Merkmalen (nominale Daten), festgelegt. Dafür sind die festzulegenden Parameter des Random-Forest-Algorithmus und eine kurze Beschreibung derselben in alphabetischer Reihenfolge dargestellt (siehe Tabelle 5-3). Anschließend wird erläutert, wie diese Parameter festzulegen sind.

Tabelle 5-3: Festzulegende Parameter eines Random-Forest-Algorithmus

Name des Parameters	Parameter Beschreibung
Criterion	Dieser Parameter legt das Qualitätskriterium eines Splitpunkts fest.
Max_depth	Dieser Parameter bestimmt die Tiefe der Bäume.
Max_features	Die Anzahl an Merkmalen, welche zur Festlegung des besten Splitpunkts untersucht werden.
Max_leaf_nodes	Beschreibt, ob die Bäume nach dem Best-First-Prinzip erzeugt werden, das als relative Reduzierung der Verunreinigung definiert ist.
Max_samples	Definiert die Anzahl der Stichproben, die aus dem Gesamtdatensatz gezogen werden.
Min_impurity_decrease	Beschreibt, ob ein Knoten geteilt wird, wenn diese Teilung eine Verringerung der Verunreinigung bewirkt.
Min_impurity_split	Beschreibt den Schwellenwert für die Verunreinigung zur Bestimmung von Knoten und Blättern.
Min_samples_leaf	Beschreibt die minimale Anzahl an Beobachtungen, welche für einen Blattknoten vorhanden sein müssen.
Min_samples_split	Beschreibt die minimale Anzahl an Beobachtungen, welche an einem Splitpunkt vorhanden sein muss.
Min_weight_fraction_leaf	Der minimale gewichtete Anteil der Gesamtsumme der Gewichte (aller Beobachtungen), der erforderlich ist, um an einem Blattknoten zu sein.
N_estimators	Anzahl der Bäume innerhalb des Random Forest.
Oob_score	Beschreibt, ob der Oob-Score zur Schätzung der Modellgüte bei ungesehenen Daten verwendet werden soll.

Random_state	Steuert die Zufälligkeit der auszuwählenden Stichprobe.
--------------	---

Für den Aufbau des Random-Forest-Algorithmus wird zu Beginn die Anzahl der Bäume festgelegt ($N_estimators$). Im Allgemeinen führt eine höhere Anzahl an Bäumen zu besseren Ergebnissen, wobei sich diese Funktion einem Grenzwert nähert.⁴¹² Außerdem steigt die benötigte Rechenkapazität mit jedem zusätzlichen Baum an. Der Aufwand des Verfahrens ist folgendermaßen zu beschreiben:

Formel 8: Aufwand des Verfahrens

$$O(M * N * \log(N))$$

mit

O	Aufwand des Verfahrens
M	Anzahl der Entscheidungsbäume
N	Anzahl der Beobachtungen

In der Literatur finden sich häufig Empfehlungen, welche einen Startwert von 500 Bäumen vorschlagen. Ausgehend hiervon kann die Anzahl der Bäume sukzessive erhöht werden, bis sich die Genauigkeit nicht mehr verbessert oder die notwendige Rechenkapazität zu hoch wird. Für das im Zuge der Arbeit zu entwickelnde Modell ist ein Startwert $N_estimators = 500$ anzunehmen.

Eine weitere Festlegung zum Aufbau des Algorithmus ist die Bestimmung der Splitkriterien. In Teilkapitel 2.4.3 wurde bereits erwähnt, dass prinzipiell $2^{L-1}-1$ Splitmöglichkeiten vorhanden sind, wobei L die Anzahl der Inputvariablen bezeichnet. Das Ziel bei der Festlegung der Splitkriterien ist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen notwendiger Rechenkapazität und Genauigkeit der Vorhersage. Typischerweise werden bei der Random-Forest-Regression nicht alle Variablen zum Trainieren eines jeden Baums verwendet. Stattdessen wächst jeder Baum nur mit einer festgelegten Anzahl an Inputvariablen. Dieser Wert wird als $max_features$ bezeichnet. Typische Werte zur Festlegung der $max_features$ sind dabei \sqrt{L} oder $\log_2 L$, wobei L die Anzahl unterschiedlicher Inputvariablen bezeichnet. Auch der Wert $\frac{L}{3}$ wird in der Literatur als

⁴¹² Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 589

Startwert angegeben.⁴¹³ Dieser Wert wird dabei insbesondere als geeignet für die Regression beschrieben. Daher gilt in dieser Arbeit $max_features = \frac{L}{3}$. Die vorgestellten Werte der Parameter sind dabei alle als Startwerte zu verstehen, welche anschließend im Zuge einer Hyperparameteroptimierung gegebenenfalls verändert werden können, um ein besseres Ergebnis zu erzielen.⁴¹⁴

Nachdem die Anzahl der Inputvariablen je Baum festgelegt wurde, erfolgt im nächsten Schritt die Festlegung des Verfahrens zur Bestimmung der Reihenfolge der Splitkriterien. Der zugehörige Parameter heißt *criterion*. Das Ziel ist es dabei, an der Wurzel des Baums Splitkriterien zu definieren, welche entweder einen hohen Beitrag zur Uneinheitlichkeit der Bäume leisten (Gini Impurity) oder den Vorhersagefehler maximal verringern (Reduktion der Varianz). Die Gini Impurity kann dabei wie folgt beschrieben werden:⁴¹⁵

Formel 9: Ermittlung der Gini Impurity

$$Gini\ Impurity = 1 - \sum_{i=1}^N p_i^2$$

mit

p_i Wahrscheinlichkeit der Zuteilung

N Anzahl der Beobachtungen

An einem Splitpunkt ist jeweils die Inputvariable mit der geringsten Gini Impurity auszuwählen. Dabei kann mittels der Parameter *min_impurity_decrease* und *min_impurity_split* eingestellt werden, bis zu welchem Grad ein Split vorgenommen wird. Analog zur Gini Impurity kann die Fehlerminimierung der Regression durch Varianzreduktion zur Auswahl der Splitvariablen genutzt werden. Sie kann wie folgt beschrieben werden:⁴¹⁶

⁴¹³ Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 129; Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 592

⁴¹⁴ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning

⁴¹⁵ Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 75; Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 593ff.

⁴¹⁶ Vgl. Brownlee (2017), Master Machine Learning Algorithms, S. 75; Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 593ff.

Formel 10: Ermittlung der Variance

$$\text{Variance} = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|^2}{N}$$

mit

\hat{y}_i Prognostizierter i-ter Wert der Zielvariable

y_i Tatsächlicher i-ter Wert der Zielvariable

N Anzahl der Beobachtungen

Dabei ist an einem Splitpunkt jeweils die Varianz zu bestimmen und die Inputvariable mit der geringsten Varianz auszuwählen. Für die vorliegende Arbeit wird die Varianzreduktion zur Auswahl der Splitkriterien angewendet, da eine Regression der Aufwände technischer Änderungen das Ziel darstellt. Daher gilt *criterion = MSE*.

Ein weiterer festzulegender Parameter ist die maximale Baumtiefe. Der Parameter *max_depth* beschreibt, wie tief ein Baum wachsen darf. Wird hier kein Wert angegeben, so wächst ein Baum so lange, bis alle Knoten rein sind (Klassifikation) oder die minimale Anzahl an zuordenbaren Beobachtungen erreicht ist (Regression). Die Festlegung erfolgt hierbei mittels der Parameter *min_impurity_split* und *min_samples_leaf*. Alternativ dazu kann der Wert manuell gesetzt werden. Für die Bewertung technischer Änderungen ist der Parameter *min_samples_leaf* zu wählen. Dabei ist die Festlegung des Parameters von der Größe des Datensets abhängig. Theoretisch kann hier jeder Wert zwischen 1 und der Anzahl der Beobachtungen in einem Datenset gewählt werden. In der Praxis werden jedoch häufig kleine Parameter für den Random-Forest-Algorithmus gewählt, da kein Overfitting zu erwarten ist. Durch die eher kleinen Datensätze aus dem Bereich der technischen Änderungen gilt für das Modell *min_samples_leaf = 2*.

Als weiterer Parameter zur Charakterisierung des Random-Forest-Algorithmus kann der Parameter *random_state* festgelegt werden. Ist es das Ziel des Trainings, ein wiederholbares Ergebnis der Vorhersage zu erzielen, muss dieser Parameter festgelegt werden. Der *random_state* beschreibt die Zufälligkeit der ausgewählten Stichproben und Variablen. Für die Bewertung der Aufwände technischer Änderung gilt daher *random_state = 42*. Nachdem die Zufälligkeit der Stichproben festgelegt wurde, folgt die Festlegung der Größe der Stichproben.

Zur Festlegung der Größe einer Stichprobe ist der Parameter *max_samples* festzulegen. Dieser Parameter ist vor allem bei besonders großen Datensets relevant, da, wie oben

beschrieben, die notwendige Rechenkapazität des Verfahrens mit der Anzahl zu verarbeitender Datensets anwächst. Für die Bewertung der Aufwände von technischen Änderungen ist davon auszugehen, dass die Anzahl der Daten nicht so groß ist, dass dieser Parameter aktiviert werden muss. Daher gilt *max_samples = none*.

Nachdem die grundlegenden Parameter des Random-Forest-Algorithmus beschrieben sind, erfolgt die Beschreibung des Trainingsvorgehens.

Vorgehen zum Trainieren

Nachdem die grundlegenden Parameter der Random-Forest-Algorithmus beschrieben sind, wird das Vorgehen zum Trainieren vorgestellt. Die Tätigkeiten zur Vorbereitung des Datensets wurden dabei bereits in Teilkapitel 5.4.1 beschrieben. Das Ziel des Trainings ist es, die Zusammenhänge zwischen den Inputvariablen (den Beschreibungsmerkmalen und Grundtypen technischer Änderungen) und den Zielvariablen (den Aufwänden technischer Änderungen) zu identifizieren. Die Random-Forest-Regression ist dabei den Verfahren des überwachten Lernens zuzuordnen.

Zu Beginn muss das Datenset, welches genutzt werden soll, aufgeteilt werden. Die beiden entstehenden Sub-Datensets werden anschließend als Testdatenset und Trainingsdatenset unterschieden. Die Aufteilung kann auf verschiedene Arten vorgenommen werden. Dabei wird den beiden Datensets eine nicht festgelegte Anzahl an Datenpunkten zugeordnet. Da wir wie bereits in Teilkapitel 2.4.3 den MSE_{Oob} als Kriterium zur Bewertung der Güte des Prädiktionsmodells eingeführt haben, erfolgt die Aufteilung zufällig in zwei Datensätze durch Bootstrapping. Das bedeutet, dass jedes Datenpunkt mit Wahrscheinlichkeit $1/n$ in den Trainingsdatensatz aufgenommen wird. Wenn ein Datenpunkt in den Trainingsdatensatz aufgenommen wird, wird er aus dem Out-of-Bag-Datensatz entfernt. Dadurch wird sichergestellt, dass jeder Datenpunkt im Out-of-Bag-Datensatz nicht in einem der Bäume im Random Forest enthalten ist. Dies ist wichtig, da es die Möglichkeit verringert, dass das Modell die Out-of-Bag-Daten überfittet. Diese Technik stellt sicher, dass die Güte des Modells nicht von der Technik abhängt, die zur Auswahl des Test- oder Trainingsdatensatzes verwendet wird.⁴¹⁷

Nachdem sichergestellt ist, dass die Prognosegüte des Modells nicht von der Auswahl der Daten abhängt, erfolgt das Training des Algorithmus. Die Parameter der Random-Forest-Regression sind bereits festgelegt. Es entstehen verschiedene Entscheidungsbäume, in welchem die Grundtypen und typenbeschreibenden Merkmale in unterschiedlicher Reihenfolge genutzt werden und somit je Baum unterschiedliche Ergebnisse entstehen können. Anschließend werden die Ergebnisse aller trainierten Bäume

⁴¹⁷ Vgl. Hastie et al. (2017), The elements of statistical learning, S. 245f.

werden zu einem Gesamtergebnis aggregiert. Der schematische Aufbau eines Random-Forest-Algorithmus ist in Abbildung 5-32 dargestellt.

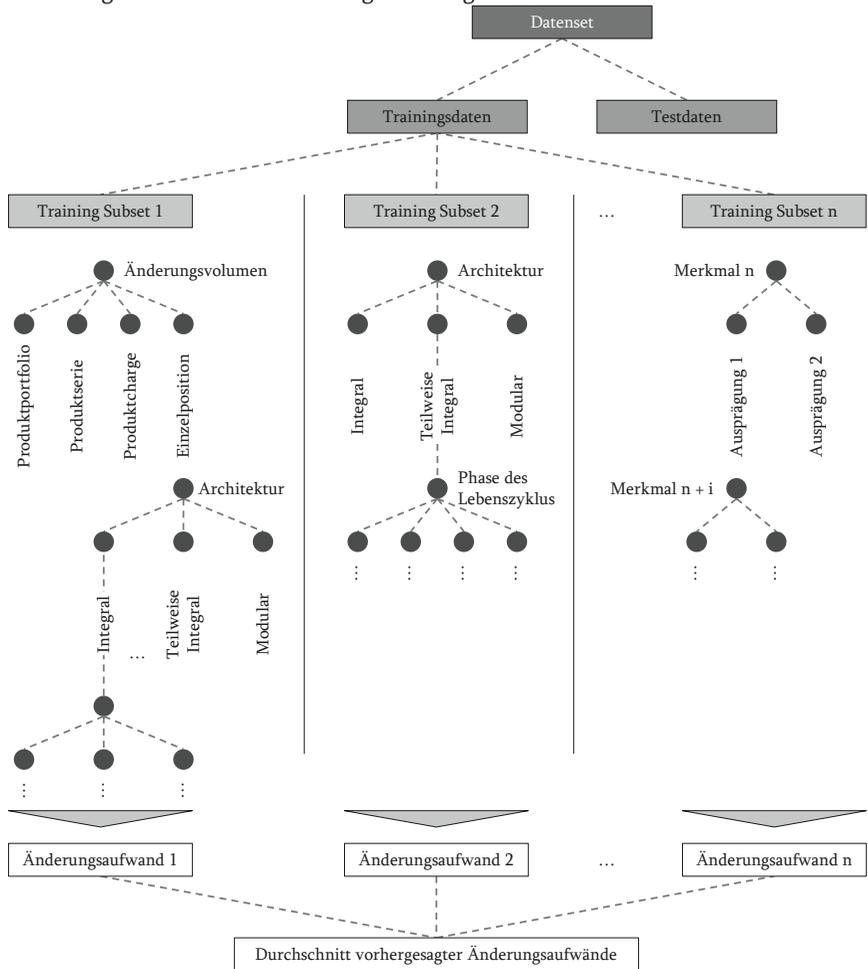


Abbildung 5-32: Schematischer Aufbau des Random-Forest-Algorithmus

Nachdem der grundlegende Aufbau der Parameter des Random-Forest-Algorithmus festgelegt und das Verfahren zur Auswahl der Daten und zum Trainieren des Random-

Forest-Regressors beschrieben ist, folgt die Beschreibung zur Evaluierung der Ergebnisse und zur Optimierung des Algorithmus.

5.4.3 Evaluation der Ergebnisse und Optimierung des Prädiktionsmodells

Das Ziel des vorliegenden Arbeitsschrittes ist es, ein Vorgehen zu beschreiben, welches es ermöglicht, den initial aufgebauten Random-Forest-Algorithmus zu evaluieren und zu optimieren. In Unterkapitel 2.4.3 wurde bereits der mittlere quadratische Fehler der Out-of-bag-Prognose (MSE_{Oob}) als geeigneter Wert zur Ermittlung der Vorhersagegenauigkeit und Optimierung des Algorithmus vorgestellt. Dieser eignet sich insbesondere dazu, die Abweichung zwischen der Vorhersage und dem realen Wert zu bestimmen. Für eine Evaluierung der Ergebnisse ist eine Interpretation des MSE_{Oob} notwendig, da dieser Wert allein keinen Hinweis darauf liefert, ob die Vorhersage eine Verbesserung gegenüber einer anderweitig erfolgten Vorhersage darstellt. Die Evaluation der Ergebnisse ist daher zu unterscheiden in eine Evaluierung des Prädiktionsmodells selbst, was durch den MSE_{Oob} erfolgt, sowie eine Evaluierung gegenüber alternativer Vorhersage von Aufwänden technischer Änderungen, wenn diese für die Vergangenheitsdaten vorliegen. Diese werden im Folgenden als manuelle Prognose bezeichnet und beschreiben eine Expertenschätzung der Aufwände für eine technische Änderung.

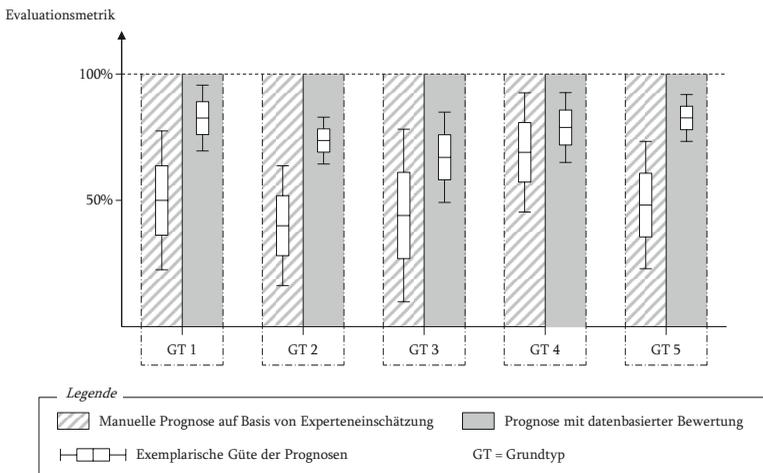


Abbildung 5-33: Exemplarische Darstellung für einen Vergleich der Prognosegüte aufgeteilt nach Grundtyp

In der Abbildung 5-33 ist eine exemplarische Darstellung der Prognosegüte dargestellt. Dabei sind 100% als keine Abweichung zwischen dem realen Wert und dem Vorhersagewert anzusehen. Der Wert 0% ist als theoretischer Wert anzusehen und würde eine unendliche Abweichung zwischen Vorhersage und realem Wert bedeuten. Auf der x-Achse sind die Grundtypen technischer Änderungen zu finden. Für jeden Grundtyp wird geprüft, ob die Prognosen der Aufwände von technischen Änderungen mittels Prädiktionsmodells besser sind als die manuellen Prognosen auf Basis von Experteneinschätzungen. Das Prädiktionsmodell ist dabei als gut zu bezeichnen, wenn die Prognose durch das Prädiktionsmodell besser ist als die manuelle Prognose. Sollten die Ergebnisse nicht zufriedenstellen sein, kann mittels Hyperparameteroptimierung eine Verbesserung angestrebt werden. Die Optimierung der Hyperparameter wird im Folgenden beschrieben.

Vorgehen zur Hyperparameteroptimierung

Die Optimierung von Hyperparametern ermöglicht eine Verbesserung des Modells. Dabei wird das bereits beschriebene Evaluationskriterium MSE_{Oob} genutzt. Im Kontext des Anwendungsfalls sind unterschiedliche Vorgehen zur Hyperparameteroptimierung möglich. Hierzu werden im Folgenden verschiedene Verfahren vorgestellt. Die manuelle Optimierung, die Zufallssuche und die Rastersuche.

Bei der manuellen Optimierung handelt es sich um eine nicht systematische Methode, welche insbesondere Expertenwissen sowohl bezüglich der Funktionsweise der Algorithmen als auch der Anwendungsdomäne erfordern. Hierbei schätzt der Anwender die Hyperparameter des Random-Forest-Algorithmus selbst ohne Vorgaben. Daher kann die manuelle Optimierung auch als Trial-and-Error-Methode beschrieben werden, um die optimalen Hyperparameter zu finden. Die Methode ist i.d.R. mit hohen Zeitaufwänden verbunden und stark von den Fähigkeiten des Anwenders abhängig. Für die hier vorliegende Optimierung ist sie aufgrund dieser Eigenschaften nicht geeignet.

Eine Alternative zur manuellen Optimierung ist die Zufallssuche. Diese zeichnet sich durch eine leichte Umsetzbarkeit aus. Sie liefert i.d.R. gute, aber nicht zwangsläufig optimale Ergebnisse. Da die Zufallssuche nicht systematisch erfolgt, ist sie nur bedingt reproduzierbar. Sie bietet jedoch den Vorteil eines geringen Rechenaufwands. Weiterhin ist hier im Gegensatz zur manuellen Optimierung weniger Expertenwissen notwendig. Trotzdem ist die Zufallssuche aufgrund der fehlenden Reproduzierbarkeit und der nicht optimalen Ergebnisse für die hier durchzuführende Optimierung als nicht geeignet anzusehen.

Abschließend wird die systematische Rastersuche vorgestellt. Dieses Vorgehen liefert eine gute Ergebnisqualität. Die Ergebnisse sind zudem reproduzierbar und nachvollziehbar. Bei der Wahl der Rastergröße sind Erfahrungen im Bereich der Hyperparameteroptimierung von Vorteil. Die Auswahl eines zu kleinen Rasters sorgt für einen sehr hohen Rechenaufwand, während durch die Festlegung zu großer Raster Optima nicht gefunden werden. Das Vorgehen wird im Folgenden vorgestellt.

Bei der Rastersuche gilt es für jeden zu optimierenden Hyperparameter ein Raster festzulegen. Dazu werden die wichtigsten Parameter des Random-Forest-Algorithmus ausgewählt. Hierzu zählen bei der Optimierung *n_estimators*, *max_features* und *max_depth*. Es werden die Kombinationen der Hyperparameter untersucht. Für jeden Parameter gilt es Start-, Endparameter und das Suchraster festzulegen. Diese sollten so gewählt werden, dass der initial gewählte Wert der Parameter zwischen den für die Hyperparameteroptimierung gewählten Start- und Endwerten liegt. Anschließend gilt es die Kombination der Parameter auszuwählen, welche hinsichtlich der Evaluierungskriterien das beste Modell zur Vorhersage von Aufwänden für technische Änderungen liefert.

Nachdem das Vorgehen zur Evaluation und zur Optimierung des Random-Forest-Algorithmus beschrieben wurde folgt die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung durch die Bewertung einer neuen Technischen Änderung, sowie der anschließenden Beschreibung zur Bündelung von technischen Änderungen zur Aufwandsminimierung.

5.5 Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen

Der Abschluss der erarbeiteten Methodik erfolgt innerhalb des fünften Teilmodells. Darin wird eine Umsetzungsempfehlung für technische Änderungen abgeleitet. Um zu dieser Umsetzungsempfehlung zu kommen, muss zu Beginn eine Bewertung der technischen Änderung durchgeführt werden. Anschließend erfolgt die Bündelung der technischen Änderungen zur Aufwandsminimierung, bevor die Umsetzungsempfehlung abgeleitet wird. Dementsprechend soll im Folgenden ein Entscheidungsmodell entwickelt werden, welches die folgende Forschungsfrage adressiert:

Wie kann mittels einer Aufwands- und Nutzenvorhersage eine änderungsaufwandsminimale Umsetzungsempfehlung für technische Produktänderungen abgeleitet werden?

Phase des CRISP-DM-Modells	Vorgehen im fünften Methodikschritt
Anwendung	5.5.1 Bewertung neuer technischer Änderungen
	5.5.2 Bündelung technischer Änderungen zur Aufwandsminimierung
	5.5.2 Ableitung einer Umsetzungsempfehlung

Abbildung 5-34: Übersicht des fünften Teilmodells

5.5.1 Bewertung neuer technischer Änderungen

Um eine Vorhersage für eine neue technische Änderung oder eine Mehrzahl von neuen technischen Änderungen durchzuführen wird ein trainierter Random-Forest-Algorithmus entsprechend den Ausführungen in Unterkapitel 5.4 benötigt. Außerdem müssen die neuen technischen Änderungen zunächst in eine für den Random-Forest-Algorithmus interpretierbare, d.h. tabellarische, Form transformiert werden. Anschließend erfolgt die Vorhersage der für jede technische Änderung zu erwartende Aufwände als Ergebnis der Anwendung des Random-Forest-Algorithmus.

Zu Beginn werden die neuen technischen Änderungen nach dem in Unterkapitel 5.1 beschriebenen Merkmalen und Ausprägungen beschrieben. Anschließend erfolgt die Zuordnung zu den Grundtypen, welche in Unterkapitel 5.2 ermittelt wurden. Der Nutzen einer technischen Änderung wird durch Workshops mit Experten bestimmt, während für die Bestimmung des Aufwands der entwickelte Random-Forest-Algorithmus genutzt wird. Im folgenden wird die Anwendung des Random-Forest-Algorithmus auf die neuen technischen Änderungen beschrieben.

Nachdem die Datenvorbereitung der neuen technischen Änderungen analog zu den in Teilkapitel 5.4.1 beschriebenen Schritten erfolgt ist, liegen die Daten der neuen technischen Änderungen in Tabellarischer Form vor (siehe Abbildung 5-35). Im Gegensatz zu den Vergangenheitsdaten sind hierbei jedoch bei den neuen technischen Änderungen keine Aufwände vorhanden, da diese erst mittels des Random-Forest-Algorithmus vorhergesagt werden.

Informationen		Merkmale			Aufwände			Gesamtaufwand
ID	Grundtyp	Änderungsvolumen	Betroffene Objektspezifikation	Betroffenes Objekt	...	Entwicklung	Produktion	
1	Technische Produktänderung	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Produkt				
2	Technische Produktänderung	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Produkt				
3	Kundenspezifische technische Änderung	Produktcharge	Funktionsweise	Produkt	...			...
4	Technische Prozessänderung	Einzelposition	Physikalische Spezifikation	Baugruppe				
5	Kundenspezifische technische Änderung	Produktportfolio	Funktionsweise	Komponente				
...

Abbildung 5-35: Inputdaten der zu bewertenden neuen technischen Änderungen

Die Ermittlung des Aufwands geschieht, indem der trainierte Random-Forest-Algorithmus auf die neuen Daten angewendet wird. Dazu werden die Datenzeilen der neuen Daten einzeln eingelesen und der trainierte Algorithmus wird auf diese angewendet. Hierdurch ergibt sich je Datenzeile eine Vorhersage der Aufwände, welche anschließend in die Tabelle ergänzt werden. Typischerweise werden hierfür Entwicklungsumgebungen wie bspw. Jupiter Notebook, Jet Brains oder ähnliches verwendet, um diese Schritte durchzuführen.

Informationen		Merkmale			Aufwände			Gesamtaufwand
ID	Grundtyp	Änderungsvolumen	Betroffene Objektspezifikation	Betroffenes Objekt	...	Entwicklung	Produktion	
1	Technische Produktänderung	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Produkt		2.500 €	4.100 €	32.000 €
2	Technische Produktänderung	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Produkt		2.000 €	5.600 €	24.500 €
3	Technische Produktänderung	Produktcharge	Funktionsweise	Produkt	...	22.500 €	2.400 €	91.700 €
4	Kundenspezifische technische Änderung	Einzelposition	Physikalische Spezifikation	Baugruppe		11.500 €	0 €	14.250 €
5	Technische Optimierung	Produktportfolio	Funktionsweise	Komponente		6.500 €	200 €	16.800 €

Abbildung 5-36: Exemplarische vorhergesagte Änderungsaufwände

Nachdem der Aufwand der neuen technischen Änderungen bestimmt ist, können die technischen Änderungen hinsichtlich Bündelung zur Aufwandsminimierung untersucht werden.

5.5.2 Bündelung technischer Änderungen zur Aufwandsminimierung

Ziel der Bündelung technischer Änderungen ist es, den Gesamtänderungsaufwand zu minimieren. Um diese Bündelung zu erreichen, müssen die Änderungsaufwände der einzelnen technischen Änderungen bekannt sein. Dies wird durch den entwickelten Algorithmus ermöglicht. Weiterhin muss bekannt sein, wie eine technische Änderung beschrieben werden kann, was durch das Beschreibungsmodell aus Unterkapitel 5.1 und die Grundtypen aus Unterkapitel 5.2 ermöglicht wird. Durch einen Vergleich der Charakteristika einer technischen Änderung sowie der anfallenden Aufwände kann die Reduktion des Gesamtänderungsaufwands bewertet werden.

Eine Aufwandsminimierung durch Bündelung kann insbesondere dadurch erzielt werden, dass gewisse Aktivitäten wie bspw. das Testen einer Komponente, das Erstellen eines Prüfberichts oder eine Beantragung der Zertifizierung trotz mehrerer Änderungen nur einmalig durchgeführt werden müssen.⁴¹⁸ Typischerweise werden dazu heute Expertenwissen oder Workshops genutzt, um die gegenseitige Beeinflussung von technischen Änderungen hinsichtlich Aufwand und Nutzen zu bewerten.⁴¹⁹ Um diese Bewertung zu unterstützen sollen das Beschreibungsmodell und die Grundtypen technischer Änderungen genutzt werden. Im Folgenden wird das Vorgehen zur Bündelung technischer Änderungen beschrieben.

Die Bündelung von technischen Änderungen stellt in diesem Fall eine ähnliche Herausforderung dar, wie sie im Release-Management zu finden ist.⁴²⁰ Als Release-Management wird die „collection of one or more new or changed configuration items deployed into the live environment as a result of one or more changes“⁴²¹ bezeichnet. Bezogen auf diese Arbeit bedeutet Release ein Bündel technischer Änderungen, welche zusammen durchgeführt werden, um den Gesamtänderungsaufwand zu minimieren. Hierzu werden zunächst die Jaccard-Koeffizienten für jeweils zwei kombinierbare Änderungen bestimmt, aus denen jeweils die Ähnlichkeit und somit die Kombinierbarkeit als Entscheidungsunterstützung hervorgehen. Im zweiten Schritt werden verschiedene Änderungsbündel durch Kombination gebildet, um diese im dritten Schritt zu bewerten und im letzten Schritt die aufwandsminimale Änderungsbündelung zu bestimmen. Diese Schritte werden im Folgenden beschrieben.

⁴¹⁸ Vgl. Aleksic (2015), Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management, S. 168

⁴¹⁹ Vgl. Aleksic (2015), Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management, S. 173

⁴²⁰ Vgl. Schuh et al. (2021), Sustainable Innovation, S. 235

⁴²¹ ISO/IEC 20000-1:2011. (2013), Information technology, Service management

Berechnung der Jaccard-Koeffizienten

Zur Bewertung der Abhängigkeit von technischen Änderungen, anhand derer die Jaccard-Koeffizienten berechnet werden, sind die zuvor gebildeten Grundtypen technischer Änderungen und die typenbeschreibenden Merkmale zu nutzen. Durch die Anwendung der Beschreibungsmodelle ist ein guter Indikator dafür vorhanden, welche technischen Änderungen miteinander kombiniert werden können. In Abbildung 5-37 sind exemplarische Bewertungen von jeweils zwei technischen Änderungen dargestellt. Außerdem kann der Abbildung der Jaccard-Koeffizient entnommen werden.

Merkmal/ ID	Grundtyp	Betroffenes Objekt	Umfang der Änderung	Notwendigkeit der Änderung	Dringlichkeit der Änderung	Zeitliche Gültigkeit
1	Grundtyp 1	Produkt	Baugruppe	Muss-Änderung	Ad-hoc	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsauftrags
2	Grundtyp 1	Produkt	Baugruppe	Muss-Änderung	Release-Änderung	Ab dem Verbrauch des Restbestands
3	Grundtyp 3	Prozess	Dokument	Muss-Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ab dem Verbrauch des Restbestands
4	Grundtyp 3	Prozess	Dokument	Muss-Änderung	Release-Änderung	Ab dem Verbrauch des Restbestands
...						
n				...		

ID	1	2	3	4	...	n
1	1	0,67	0,15	0,5		
2		1	0,33	0,5		
3			1	0,83		...
4				1		
...						
n				...		

Abbildung 5-37: Beispielhafte Jaccard-Koeffizient für Änderungsbündel

Dabei deutet ein hoher Jaccard-Koeffizient (1) darauf hin, dass Änderungen potenziell besser miteinander kombinierbar sind. Ein niedriger Jaccard-Koeffizient (0) deutet auf eine schlechte Kombinierbarkeit hin. Somit kann diese Matrix für die im dritten Schritt erfolgende Bewertung der Änderungsbündel als Entscheidungsgrundlage verwendet werden.

Definition von Änderungsbündeln durch Kombinatorik

Zur Definition von Änderungsbündeln werden alle vorhandenen technischen Änderungen miteinander kombiniert. Dazu wird eine Mengenkombination genutzt, wodurch jede Änderung entweder einem Bündel zugeordnet ist oder nicht. Daraus er-

geben sich 2^n mögliche Kombinationen, wobei n die Anzahl der zu bewertenden technischen Änderungen darstellt. Bei $n = 4$ gibt es somit $2^4 = 16$ Kombinationen, in denen die technischen Änderungen zu Bündeln zusammengefasst werden können. Die Kombinatorik der technischen Änderungen kann als Matrix dargestellt werden, welche im Kontext dieser Arbeit als Änderungskombinationsmatrix bezeichnet wird. Die sich aus der Kombinatorik von vier Änderungen ergebende Änderungskombinationsmatrix ist beispielhaft in Abbildung 5-38 dargestellt.

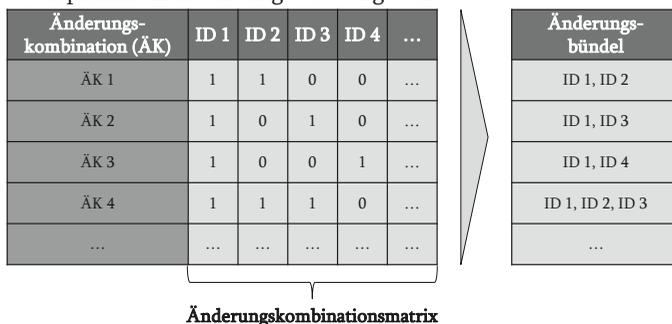


Abbildung 5-38: Definition von Änderungsbündeln durch Kombinatorik

In dieser Kombinatorik sind zunächst alle Kombinationen von Änderungen zugelassen, um eine umfassende Bewertungsgrundlage zu bilden. Die so gebildeten Änderungsbündel werden für die Bewertung der jeweiligen Reduktion des Gesamtänderungsaufwands verwendet.

Bewertung der Änderungsbündel

Im dritten Schritt wird die Aufwandsreduktion der jeweiligen Kombination von Änderungen zu Änderungsbündeln bewertet. Dies erfolgt durch Experten des Änderungsmanagements und der spezifischen Domänen, welche durch die zuvor bestimmten Jacard-Koeffizienten bei der Bestimmung unterstützt werden. Als ergänzende Entscheidungsunterstützung können die prognostizierten Aufwände der technischen Änderungen in den einzelnen Leistungsbereichen verwendet werden, welche im Folgenden als Aufwandsprofile bezeichnet werden. Diese Aufwandsprofile zeigen für ein ausgewähltes Bündel von technischen Änderungen, in welchen Bereich die Aufwände der einzelnen Änderungen zu erwarten sind. In Abbildung 5-39 ist ein Aufwandsprofil für ein Bündel technischer Änderungen exemplarisch dargestellt.

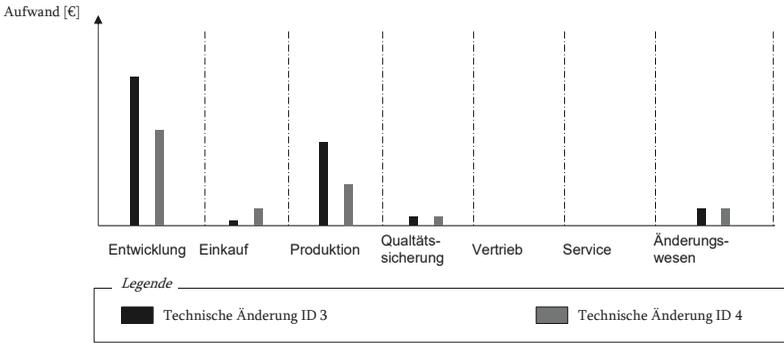


Abbildung 5-39: Aufwandsprofil technischer Änderungen

Aus dem Beispiel wird ersichtlich, dass beim Bündel aus den zwei technischen Änderungen die größten Aufwände im Bereich der Entwicklung und Produktion anfallen. In diesen beiden Bereichen sind somit die größten Potenziale zur Aufwandsminimierung vorhanden. Außerdem können bei der Nachverfolgung und Dokumentenverwaltung Aufwände im Änderungswesen eingespart werden. Hierüber können die potenziellen Aufwandsreduktionen von Experten besser spezifiziert werden.

Im Rahmen der Expertenarbeit werden Faktoren bestimmt, welche den prozentualen Anteil der sich aus der Kombination zu Änderungsbündeln ergebenden Aufwände in Bezug auf die Summe der jeweiligen Einzelaufwände repräsentieren. In Abbildung 5-40 sind beispielhaft Faktoren für gebildete Änderungsbündel dargestellt.

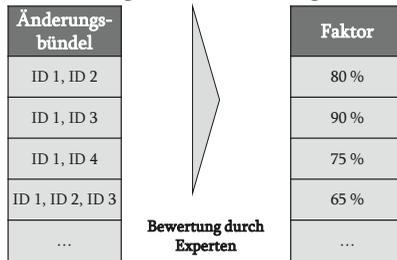


Abbildung 5-40: Bewertung der Aufwandsreduktion durch Änderungsbündelung

So ergibt sich bspw. eine Aufwandsreduktion durch die Bündelung der Änderungen ID 1 und ID 2 auf 80% im Vergleich zur Summe der Einzelaufwände der beiden entsprechenden technischen Änderungen. Der sich so ergebende Aufwandsreduktionsvektor gibt die von den Experten ermittelten prozentualen Faktoren an, auf welche

sich die Summe der Einzelaufwände der entsprechend beinhalteten technischen Änderungen reduzieren. Dieser wird im nächsten Schritt zur Auswahl der aufwandsminimierenden Änderungsbündel verwendet.

Auswahl aufwandsminimierender Änderungsbündel

Das Ziel des letzten Schrittes ist die Auswahl derjenigen Änderungsbündel, welche eine Minimierung des Gesamtänderungsaufwands ergeben. Hierfür erfolgt zunächst die Formulierung der beschriebenen Elemente, um hierüber anschließend die Optimierung durchzuführen.

Für die Auswahl der optimalen, d.h. gesamtaufwandsminimierenden Änderungsbündel sind zunächst für jede Kombination die sich ergebenden Aufwände zu berechnen. Hierfür wird zunächst die Änderungskombinationsmatrix mit dem Vektor der Einzelaufwände der Änderungen skalar multipliziert (Formelzeichen „*“). Der sich ergebende Vektor wird anschließend per elementweiser Hadamard-Multiplikation (Formelzeichen „◦“) mit dem Aufwandsreduktionsvektor multipliziert:

$$\vec{p} = (AM * \vec{k}) \circ \vec{f}$$

mit

\vec{p}	Änderungsbündelkostenvektor
AM	Änderungskombinationsmatrix
\vec{k}	Vektor der Einzelaufwände der Änderungen
\vec{f}	Aufwandsreduktionsvektor

Es gilt nun diejenigen Änderungsbündel bzw. Änderungskombinationen auszuwählen, die in Kombination miteinander die insgesamt geringsten Aufwände ergeben. Dies erfolgt durch die Lösung eines kombinatorischen Optimierungsproblems, bspw. durch die Anwendung von Branch-and-Bound-Algorithmen.⁴²² Das Ergebnis ist eine Kombination derjenigen technischen Änderungsbündel und technischen Änderungen, welche in der Gesamtheit die minimalen Gesamtaufwände erzeugen.

Das Vorgehen wird zur Verbesserung der Anwendbarkeit aus Sicht eines Anwenders kurz erläutert.

⁴²² Vgl. Shih (1979), A Branch and Bound Method for the Multiconstraint Zero-One Knapsack Problem

Änderung	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4	ID 5	Änderungs- bündelkosten ohne Aufwands- reduktion	Aufwandsre- duktionsfaktor	Änderungs- bündelkosten mit Aufwands- reduktion durch Bündelung
Einzelaufwand gesamt (Änderung)	25.000,00 €	32.000,00 €	11.000,00 €	13.500,00 €	18.000,00 €			
Änderungs- kombination (ÄK)	Änderungskombinationsmatrix							
AK 1	0	0	0	0	1	18.000 €	100%	18.000 €
AK 2	0	0	0	1	0	13.500 €	100%	13.500 €
AK 3	0	0	0	1	1	31.500 €	70%	22.050 €
AK 4	0	0	1	0	0	11.000 €	100%	11.000 €
AK 5	0	0	1	0	1	29.000 €	95%	27.550 €
AK 6	0	0	1	1	0	24.500 €	96%	23.520 €
AK 7	0	0	1	1	1	42.500 €	77%	32.725 €
AK 8	0	1	0	0	0	32.000 €	100%	32.000 €
AK 9	0	1	0	0	1	50.000 €	78%	39.000 €
AK 10	0	1	0	1	0	45.500 €	92%	41.860 €
AK 11	0	1	0	1	1	63.500 €	92%	58.420 €
AK 12	0	1	1	0	0	43.000 €	95%	40.850 €
AK 13	0	1	1	0	1	61.000 €	72%	43.920 €
AK 14	0	1	1	1	0	56.500 €	83%	46.895 €
AK 15	0	1	1	1	1	74.500 €	76%	56.620 €
AK 16	1	0	0	0	0	25.000 €	100%	25.000 €
AK 17	1	0	0	0	1	43.000 €	86%	36.980 €
AK 18	1	0	0	1	0	38.500 €	82%	31.570 €
AK 19	1	0	0	1	1	56.500 €	72%	40.680 €
AK 20	1	0	1	0	0	36.000 €	86%	30.960 €
AK 21	1	0	1	0	1	54.000 €	93%	50.220 €
AK 22	1	0	1	1	0	49.500 €	80%	39.600 €
AK 23	1	0	1	1	1	67.500 €	69%	46.575 €
AK 24	1	1	0	0	0	57.000 €	96%	54.720 €
AK 25	1	1	0	0	1	75.000 €	93%	69.750 €
AK 26	1	1	0	1	0	70.500 €	74%	52.170 €
AK 27	1	1	0	1	1	88.500 €	69%	61.065 €
AK 28	1	1	1	0	0	68.000 €	75%	51.000 €
AK 29	1	1	1	0	1	86.000 €	83%	71.380 €
AK 30	1	1	1	1	0	81.500 €	85%	69.275 €
AK 31	1	1	1	1	1	99.500 €	86%	85.570 €

Abbildung 5-41: Beispielhafte Kosten bei Bündelung von Änderungen

Zunächst wird, durch Kombinatorik die Änderungskombinationsmatrix erstellt, wobei zunächst sämtliche Kombinationen aufgestellt und hierüber Bündel gebildet werden. Die „1“ in der Änderungskombinationsmatrix bedeutet dabei, dass eine Änderung in das Bündel aufgenommen wird. Die einzige zu eliminierende Kombination ist die, bei der keine Änderung umgesetzt wird (0, 0, 0, 0, 0). Der Vektor der Einzelaufwände ist direktes Ergebnis der Anwendung des Prädiktionsmodells und kann direkt ermittelt bzw. übernommen werden. Basierend auf der Änderungskombinationsmatrix, den jeweiligen Jaccard-Koeffizienten sowie den Aufwandsprofilen für jedes Bündel werden Workshops mit Experten aus dem Änderungsmanagement sowie den einzelnen Domänen durchgeführt und die jeweilige Aufwandsreduktion durch Bündelung ermittelt. Der Aufwandsreduktionsfaktor ist dabei der Anteil der sich durch die Bündelung ergebenden Gesamtkosten, bezogen auf die Summe der Einzelkosten der Änderungen. Werden bspw. die Änderungen ID 1 und ID 2 einzeln umgesetzt, betragen die Gesamt-

kosten $25.000 \text{ €} + 32.000 \text{ €} = 57.000 \text{ €}$. Im Expertenworkshop wird anschließend ermittelt, dass die Gesamtkosten durch die Bündelung der Änderungen ID 1 und ID 2 (Änderungskombination ÄK 24) aufgrund von Skalen- und Verbundeffekten auf 96%, also auf $57.000 \text{ €} * 96\% = 54.720 \text{ €}$, sinken würden. Es wird ersichtlich, dass bei dieser Betrachtung die Änderungen ID 3, ID 4 und ID 5 unberücksichtigt bleiben. Um also zu ermitteln, welche Kombination von Änderungskombinationen zu den minimalen Gesamtaufwänden führt, ist bspw. mittels Branch-and-Bound-Lösungsverfahren die gesamtaufwandsminimale Kombination an Änderungskombinationen zu ermitteln. Im betrachteten Beispiel führt dabei die Umsetzung von Änderung ID 3 (ÄK 4) einzeln und die Umsetzung von Änderungsbündel ÄK 27 (ID 1, ID 2, ID 4, ID 5) zu den minimalen Gesamtänderungskosten ($11.000 \text{ €} + 61.065 \text{ €} = 72.065 \text{ €}$). Neben der Bündelung der Gesamtänderungskosten muss der Gesamtnutzen eines Änderungsbündels ermittelt werden. Dieser Gesamtnutzen ergibt sich dabei als Summe der Einzelnutzen der technischen Änderungen.

Nachdem die Bündelung technischer Änderungen zur Aufwandsminimierung beschrieben ist, folgt die Ableitung von Umsetzungsempfehlungen für technische Änderungen.

5.5.3 Ableitung einer Umsetzungsempfehlung

Das Ziel dieses Teilkapitels ist es, eine Umsetzungsempfehlung für technische Änderungen abzuleiten. Dabei ist zu prüfen, ob eine technische Änderung oder ein Bündel von technischen Änderungen wirtschaftlich ist, was in positiven oder negativen monetären Effekten ausgedrückt wird.⁴²³ Hierzu wird auf den zuvor bestimmten Nutzen und Aufwand zurückgegriffen. Generell kann eine Änderung dabei als wirtschaftlich betrachtet werden, wenn der Nutzen einer Änderung oder eines Änderungsbündels den Aufwand der Änderung oder des Änderungsbündels übersteigt. Somit sind die folgenden Fälle zu unterscheiden, um zu einer Umsetzungsempfehlung zu gelangen:

1. Aufwand > Nutzen
2. Aufwand < Nutzen
3. Aufwand = Nutzen

Als wirtschaftlich wird eine technische Änderung bzw. ein Release bezeichnet, wenn der Nutzen einer technischen Änderung den Aufwand zur Durchführung einer Änderung übersteigt (1). Somit ist eine technische Änderung wirtschaftlich, wenn gilt:

⁴²³ Vgl. Langer (2016), Änderungsmanagement, S. 520

Formel 11: Wirtschaftlichkeit von technischer Änderung oder Release

$$\sum \text{Nutzen } T\ddot{A}_i > \sum \text{Aufwand } T\ddot{A}_i$$

mit

ΔHK_i Einsparung der Herstellkosten durch Änderung i

ΔUE_i Steigerung des Umsatzerlöses durch Änderung i

$\text{Aufwand } T\ddot{A}_i$ Prognostizierte Aufwände der Änderung i

Analog hierzu kann eine Änderung oder ein Release als nicht wirtschaftlich (2) bezeichnet werden, wenn gilt:

Formel 12: Nichtwirtschaftlichkeit von technischer Änderung oder Release

$$\sum \text{Nutzen } T\ddot{A}_i < \sum \text{Aufwand } T\ddot{A}_i$$

mit

ΔHK_i Einsparung der Herstellkosten durch Änderung i

ΔUE_i Steigerung des Umsatzerlöses durch Änderung i

$\text{Aufwand } T\ddot{A}_i$ Prognostizierte Aufwände der Änderung i

Sollten die Aufwände einer Änderung gleich dem Nutzen (3) sein, kann diese Änderung als kostendeckend bezeichnet werden:

Formel 13: Kostendeckende technische Änderung oder Release

$$\sum \text{Nutzen } T\ddot{A}_i = \sum \text{Aufwand } T\ddot{A}_i$$

mit

ΔHK_i Einsparung der Herstellkosten durch Änderung i

ΔUE_i Steigerung des Umsatzerlöses durch Änderung i

Aufwand $T\ddot{A}_i$ Prognostizierte Aufwände der Änderung i

In der hier vorgestellten Entscheidungsheuristik wird die Entscheidung lediglich anhand der Wirtschaftlichkeit bewertet. Zu beachten ist, dass auch zunächst nicht wirtschaftliche Änderungen für eine Umsetzung in Betracht gezogen werden müssen. Insbesondere bei sicherheitsrelevanten technischen Änderungen sowie sich ändernden gesetzlichen Anforderungen kann die Durchführung einer nicht wirtschaftlichen technischen Änderung eine Voraussetzung dafür sein, dass zukünftig Produkte verkauft werden dürfen. Hierbei muss die Gesamtwirtschaftlichkeit eines Produktes nach einer Änderung betrachtet werden und nicht nur die Wirtschaftlichkeit einzelner Änderungen. Da dies von sehr vielen individuellen Faktoren der Unternehmen und des Marktumfeldes abhängig ist, wird dieser Sonderfall nicht untersucht.

Weiterhin bietet die Bündelung von technischen Änderungen zu einem Release eine Möglichkeit, einzelne nicht wirtschaftliche technische Änderungen zu einem wirtschaftlichen Release zusammenzufassen. Hierzu muss die Bewertung der Wirtschaftlichkeit angepasst werden:

Formel 14: Bewertung der Wirtschaftlichkeit eines Release

$$\text{Wirtschaftlichkeit } R_n = \sum_1^k (\text{Nutzen } T\ddot{A}_i - \text{Aufwand } T\ddot{A}_i)$$

mit

Wirtschaftlichkeit R_n	Wirtschaftlichkeit des Release n
Nutzen $T\ddot{A}_i$	Nutzen der technischen Änderung i
Aufwand $T\ddot{A}_i$	Aufwand der technischen Änderung i
k	Anzahl Änderungen in einem Release

Dabei müssen folgende Schritte zur Bündelung von technischen Änderungen durchgeführt werden. Neben der Bewertung hinsichtlich der Bündelbarkeit verschiedener Änderungen mittels Jaccard-Koeffizienten folgt die Bewertung der Experten zur Kosteneinsparung. Das Ergebnis kann dem Änderungsbündelkostenvektor entnommen werden.

Nachdem Aufwand und Nutzen sowohl für die Einzeländerungen als auch für die Änderungsbündel bestimmt wurden, kann die Umsetzungsempfehlung getroffen werden. Die Umsetzungsempfehlung bezüglich der Einzeländerungen sowie der Änderungsbündel kann, wie in Abbildung 5-42 gezeigt, dargestellt werden.

	ID 1	ID 2	ID 3	ID 4	Aufwand	Nutzen	Monetäre Bewertung	Wirtschaftlichkeit	Änderungsbündelkostenvektor	Änderungsbündelnutzenvektor	Monetäre Bewertung	Wirtschaftlichkeit		
ÄK 1	1	1	0	0	ID 1	42.369 €	25.130 €	-17.239 €	Nein	ÄK 1	51.580 €	43.236 €	-8.344 €	Nein
ÄK 2	1	0	1	0	ID 2	22.106 €	18.106 €	-4.000 €	Nein	ÄK 2	60.712 €	71.612 €	10.900 €	Ja
ÄK 3	1	0	0	1	ID 3	25.089 €	46.482 €	21.393 €	Ja	ÄK 3	58.545 €	91.612 €	33.067 €	Ja
ÄK 4	1	1	1	0	ID 4	35.691 €	66.147 €	30.456 €	Ja	ÄK 4	58.216 €	89.718 €	31.502 €	Ja

Abbildung 5-42: Exemplarische Darstellung der Umsetzungsempfehlung

Zur Ermittlung der minimalen Änderungskosten ist, wie in Teilkapitel 5.4.2 beschrieben, ein Branch-and-Bound-Algorithmus anzuwenden. Basierend auf diesen Algorithmus sind die folgenden Änderungen bzw. Releases aus Abbildung 5-41 auszuwählen: Änderungskombination 4, also die Änderung mit ID 3 und Kosten von 11.000 €, sowie die Änderungskombination 27, also ein Release bestehend aus den IDs 1, 2, 4 und 5, minimieren die Gesamtänderungskosten bei der Durchführung aller Änderungen.

Nachdem in Unterkapitel 5.5 die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung technischer Änderungen vorgestellt wurde, folgt im Unterkapitel 5.6 ein Zwischenfazit zur Methodik.

5.6 Zwischenfazit: Methodik zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen

In diesem Kapitel wurde die Methodik zur datenbasierten Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Analyseverfahren detailliert. Hierzu wurde in Unterkapitel 5.1 eine Beschreibung technischer Änderungen auf Basis von Merkmalen und Ausprägungen durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde eine Literaturanalyse durchgeführt, mit der die in der Literatur vorhandenen Merkmale identifiziert und konsolidiert werden konnten. Weiterhin wurden diese Merkmale anschließend operationalisiert und ein Beschreibungsmodell für technische Änderungen wurde abgeleitet. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden in Unterkapitel 5.2 differenzierbare Grundtypen technischer Änderungen ermittelt. Darauf folgte ein Exkurs in den Bereich der

typenbildenden Verfahren, in welchem das Konzept der Typologien als ordnendes Element erläutert wurde. Anschließend wurden typenbildende Merkmale bestimmt, wobei die Ergebnisse des Unterkapitels 5.1 wieder aufgegriffen wurden. Nach Identifizierung der typenbildenden Merkmale erfolgte deren Konsistenzanalyse. Auf Basis der Konsistenzanalyse und der abgeleiteten Szenarien wurden anschließend mittels Clusteranalyse die Grundtypen technischer Änderungen definiert. Außerdem wurden alle Grundtypen detailliert beschrieben. In Unterkapitel 5.3 wurden die Aufwands- und Nutzendimensionen technischer Änderungen beschrieben. Hierzu erfolgte ein Exkurs in die Systemtheorie, ehe die Systemgrenzen für technische Änderungen bestimmt wurden. Zu diesem Zweck wurde die Systemtheorie auf das Unternehmen angewendet, so dass neben den Systemgrenzen auch Partialsysteme definiert werden konnten. Aufbauen auf diesen konnte ein Kalkulationsschema für die Aufwände der technischen Änderungen festgelegt werden, um sicherzustellen, dass alle durch technische Änderungen induzierten Aufwände erfassen werden. Abschließend wurden die Nutzendimensionen technischer Änderungen beschrieben, welche die unterschiedlichen Arten von Nutzen, die durch technische Änderungen entstehen, darstellen. Diese werden für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit einer technischen Änderung benötigt. In Unterkapitel 5.4 erfolgte die Entwicklung des Random-Forest-Algorithmus zur Aufwandsabschätzung technischer Änderungen. Hierzu wurde zu Beginn das Vorgehen zur Datenvorbereitung beschrieben und die notwendigen Inputdaten wurden vorgestellt. Anschließend wurden die notwendigen Parameter für den Aufbau des Random-Forest-Algorithmus definiert. Weiterhin wurde ein Vorgehen zur Evaluierung der Ergebnisse und zur Optimierung des Random Forest präsentiert sowie Aufwandsprofile abgeleitet, welche im abschließenden Unterkapitel 5.5 zur Unterstützung von Expertenschätzungen genutzt wurden. Das Ziel des Unterkapitels 5.5 war es, eine Umsetzungsempfehlung für eine technische Änderung abzuleiten. Hierzu wurden ein Entscheidungsmodell zur Bewertung, ein Verfahren zur Bündelung von technischen Änderungen zur Aufwandsminimierung und die Ableitung der Umsetzungsempfehlung beschrieben.

6 Validierung und kritische Reflexion

Im vorangehenden Kapitel wurde eine allgemeingültige Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse zum Zweck der Minimierung der Gesamtänderungsaufwände erarbeitet und anhand beispielhafter Daten erläutert. Ziel dieses Kapitels ist die kritische Reflexion der Anwendungserfahrung bei der Windenergie GmbH. Die Methodik wurde mit Daten der Windenergie AG im Rahmen des Forschungsprozesses umgesetzt. Für die kritische Reflexion der Anwendungserfahrung wird zunächst die Ausgangssituation der Windenergie AG erläutert. Anschließend wird die Erprobung und Validierung der Methodik in anonymisierter Form beschrieben. Dabei werden die einzelnen Arbeitsschritte durchlaufen und die Ergebnisse aus der Anwendung dargelegt. Abschließend erfolgt die kritische Reflexion der Anwendungserfahrung zur Ermittlung der Limitationen und des weiteren Forschungsbedarfs.

6.1 Ausgangssituation der Windenergie AG

Die Windenergie AG ist ein weltweit agierender Entwickler und Hersteller von Windenergieanlagen. Sie bietet ein breites Produktportfolio an, welches sowohl Onshore- als auch Offshore-Windenergieanlagen umfasst. Historisch von der Entwicklung und Herstellung einzelner Windenergieanlagen ausgehend, sind heute zumindest Kleinserien auch in der Windenergiebranche üblich. Aufgrund von unterschiedlichen Länderanforderungen und Standortbedingungen sind technische Änderungen an den Anlagen jedoch keine Seltenheit. Durch die stark wachsenden Anforderungen, die kundenspezifische Individualisierung und hohe Volatilität in den regulatorischen Anforderungen sind insbesondere bereits im Entwicklungsprozess, aber auch in der Herstellungsphase, technische Änderungen eher die Regel als die Ausnahme. Insbesondere die lange Laufzeit der Projekte, welche teilweise bis zu 200 einzelne Windenergieanlagen umfassen können, stellt hohe Anforderungen an das technische Änderungsmanagement. Daher ist das Unternehmen sehr auf die Nachverfolgung von technischen Änderungen bedacht, sieht sich jedoch insbesondere bei deren Planung nicht ausreichend aufgestellt. Eine Unterstützung bei der Bewertung von technischen Änderungen durch eine entsprechende Methodik bietet dem Unternehmen daher die Chance, die Bewertung technischer Änderungen zu verbessern.

Im Zuge der Validierung sind über 400 technische Änderungen analysiert worden. Typischerweise sind größere Datensets für die prädiktive Datenanalyse erforderlich und sinnvoll, da sie einen positiven Einfluss auf die Vorhersagequalität haben. Weiterhin sind die hinterlegten Aufwände der technischen Änderungen lediglich als Gesamtkostenblock vorhanden, so dass in der Validierung keine Unterscheidung zwischen den Aufwänden, welche für einzelne Leistungsbereiche anfallen, durchgeführt wird. Im Zuge dieser Validierung stehen daher insbesondere die Anwendbarkeit des Vorgehens und die grundsätzliche Nutzung von prädiktiver Datenanalyse zur Bewertung technischer Änderungen im Vordergrund.

Alle in der Validierung genutzten Algorithmen sind in der Programmiersprache Python geschrieben. Die entsprechende Programmierung ist dem Anhang zu entnehmen.

6.2 Anwendung der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse

In diesem Kapitel wird die Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse vorgestellt. Hierzu wurden bei der Windenergie AG die einzelnen Schritte durchlaufen. Die Daten werden zur besseren Nachvollziehbarkeit in einfachen Beschreibungselementen wie Tabellen, Matrizen etc. exemplarisch dargestellt. Die vollständigen Daten sowie die dazugehörige Programmierung können dem Anhang entnommen werden.

6.2.1 Beschreibung technischer Änderungen

Zu Beginn mussten die vorhandenen Daten, welche innerhalb des ERP-Systems vorlagen (hier SAP), extrahiert werden, um sie weiterzuverarbeiten. Hierzu wurde jedem Änderungsantrag eine eigenen Änderungs-ID für diese Validierung zugeordnet. Anschließend wurden die Informationen der technischen Änderungen genutzt, um die technischen Änderungen entsprechend dem Beschreibungsmodell aus Teilkapitel 5.1.3 zu beschreiben. Anschließend lagen alle notwendigen Informationen in tabellarischer Form vor. Die in Abbildung 6-1 gezeigten Daten (vollständiger Datensatz siehe Anhang A2) bildeten die Ausgangsbasis für alle folgenden Schritte innerhalb dieser Validierung. Da die Windenergie AG den Gesamtänderungsaufwand technischer Änderungen lediglich als Gesamtaufwand und nicht spezifiziert nach Abteilungen vorliegen hatte, wurde für die Validierung lediglich der Gesamtänderungsaufwand einer technischen Änderung ermittelt.

Damit die Güte des Prädiktionsmodells ermittelt werden konnte, wurde ein Teil der Daten zurückgehalten und als Testdaten genutzt. Außerdem erfolgte anschließend die

Prädiktion der Aufwände und die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung für neue technische Änderungen. Die Daten wurden analog zum Vorgehen aus Teilkapitel 5.4.1 vorbereitet.

Informationen		Merkmale			Aufwände
ID	Änderungs- volumen	Betroffene Objektspezifikation	Betroffenes Objekt	...	Gesamtänderungs- aufwand
1	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Betriebsmittel		20.500 €
2	Einzelposition	Physikalische Spezifikation	Betriebsmittel		18.600 €
3	Produktcharge	Physikalische Spezifikation	Prozess		1.900 €
4	Produktcharge	Physikalische Spezifikation	Komponente	...	30.500 €
5	Produktcharge	Informationen	Produkt		4.300 €
6	Produktserie	Informationen	Dokument		3.700 €
7	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Komponente		12.900 €
...

Abbildung 6-1: Ausgangsbasis der Validierung

Nachfolgend werden mit den typenbildenden Merkmalen die Grundtypen technischer Änderungen beschrieben. Die nicht typenbildenden werden im weiteren Verlauf für genau wie die Grundtypen für die Prognose genutzt.

6.2.2 Ermittlung der Grundtypen

Nachdem über die einheitliche Beschreibung der technischen Änderungen anhand der Merkmale und Ausprägungen die Ausgangsbasis für das weitere Vorgehen geschaffen war, wurden anschließend die Grundtypen der technischen Änderungen mittels der typenbildenden Merkmale bestimmt. Dies erfolgte durch die Berechnung der Ähnlichkeiten zwischen einer technischen Änderung und den Grundtypen anhand des Jaccard-Koeffizienten (siehe Kapitel 5.4). Da dieser Schritt anhand eines Algorithmus automatisch erfolgt, wird im Rahmen der Validierung lediglich auf die Ergebnisse verwiesen. Der Algorithmus ist in Anhang A4 dargestellt und wird auf die Daten aus dem vorausgegangenen Schritt angewendet. Die berechneten Jaccard-Koeffizienten sowie die sich ergebenden Änderungsgrundtypen sind auszugsweise in Abbildung 6-2 dargestellt. Bei gleichen Jaccard-Koeffizienten ist die Auswahl zwischen den möglichen Grundtypen durch einen Experten zu treffen. Das vollständige Ergebnis für die Berechnung ist in Anhang A2 in tabellarischer Form dargestellt.

Jaccard Koeffizienten					
ID	Grundtyp 1	Grundtyp 2	Grundtyp 3	Grundtyp 4	Grundtyp 5
1	0	0,67	0,25	0	0,25
2	0,25	0,25	0,11	0,11	0,11
3	0	0,11	0	0,42	0,11
4	0,11	0,11	0	0	0,42
5	0,67	0	0,11	0,11	0,11
6	0	0,25	0,11	0	0,11
7	0	0,25	0,11	0	0,25
...



Ausgewählter Grundtyp
2
2
4
5
1
2
5
...

Abbildung 6-2: Jaccard-Koeffizienten mit ermitteltem Grundtyp

In der Anwendung wurden die tabellarisch strukturierten Daten um eine Spalte erweitert, in der die Nummer des Grundtyps gespeichert wurde. Nach Ermittlung der Grundtypen der technischen Änderungen erfolgte die Bewertung von Aufwand und Nutzen.

6.2.3 Aufwand und Nutzen technischer Änderungen

Nachdem die technischen Änderungen beschrieben und die Grundtypen ermittelt waren, wurde zuerst der Nutzen der technischen Änderungen bestimmt. Aufwand und Nutzen wurden für die technischen Änderungen mit den IDs 420–430 ermittelt, da dies neue technische Änderungen sind, für welche noch eine Umsetzungsempfehlung abgeleitet werden musste.

Zur Ermittlung des Nutzens wurden Expertenworkshops mit Teilnehmenden aus Unterschiedlichen Fachbereichen durchgeführt. Hierbei wurde eine Abschätzung von Herstellkostenreduktion bzw. Steigerung des Umsatzerlöses vorgenommen. Da es sich bei allen Änderungen um technische Änderungen in einem bereits laufenden Projekt handelt, wurden in diesem Fall lediglich Herstellkostenreduktionen ermittelt. Die Ergebnisse des Workshops sind Abbildung 6-3 zu entnehmen.

Für die Ermittlung des Aufwands musste zunächst das Prädiktionsmodell trainiert werden. Hierzu wurden die Vergangenheitsdaten der technischen Änderung genutzt. Der Aufbau des Prädiktionsmodells erfolgte anhand des in Teilkapitel 5.4.2 beschriebenen Vorgehens. Nachdem die Datenbasis als geeignet zum Trainieren des Prädiktionsmodells befunden wurde, konnte die Festlegung der Parameter erfolgen. Hierzu wurde eine Pipeline erstellt. Eine Pipeline wird in der Datenverarbeitung und im Maschinellen Lernen verwendet, um eine sequenzielle Abfolge von Datenverarbeitungs-

schritten zu definieren und auszuführen. Es handelt sich um eine Verkettung von Verarbeitungsschritten, bei der die Ausgabe eines Schrittes als Eingabe für den nächsten Schritt dient. Die Verwendung einer Pipeline bietet eine Reihe von Vorteilen, darunter die Automatisierung von Verarbeitungsschritten und die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen. In diesem Fall wird die Pipeline zur Datenvorbereitung, Modellbildung und zum Training sowie zur Hyperparameteroptimierung genutzt. Hierzu erfolgte im ersten Schritt das Laden der Daten zum Trainieren des Modells.

Anschließend erfolgte die Aufteilung der Daten in Trainings- und Testdaten. Weiterhin wurden die Startwerte für unterschiedliche Parameter des Modells analog zur Beschreibung aus Teilkapitel 5.4.2 festgelegt. Diese sind in Tabelle 6-1 dargestellt.

Tabelle 6-1: Auswahl der Startparameter

Name des Parameters	Anwendung und Startwert des Parameters
Criterion	MSE _{Oob}
Max_depth	<i>min_samples_leaf</i>
Max_features	$\frac{L}{3}$
Max_leaf_nodes	Nicht angewendet
Max_samples	<i>none</i>
Min_impurity_decrease	Nicht angewendet
Min_impurity_split	Nicht angewendet
Min_samples_leaf	2
Min_samples_split	Nicht angewendet
Min_weight_fraction_leaf	Nicht angewendet
N_estimators	500
Oob_score	true
Random_state	42

Nachdem die Daten in das Modell geladen und die Startparameter für das Modell festgelegt waren, erfolgte die Festlegung der Parameter für die Hyperparameteroptimierung und die Evaluation der Ergebnisse. Wie in Teilkapitel 5.4.3 beschrieben, wurde eine Rastersuche (GridSearchCV) angewendet. Hierbei wurden die in

Tabelle 6-2 beschriebenen Parameter und Rasterwerte ausgewählt.

Tabelle 6-2: Werte der Hyperparameteroptimierung

Name des Parameters	Rasterwerte zur Optimierung
Max_depth	1, 10, 100, 200
Max_features	1, 2, 3, 4, sqrt
N_estimators	100, 500, 1000, 2000

Nach Abschluss der Hyperparameteroptimierung wurde das Prädiktionsmodell mit der besten Vorhersagegüte ausgewählt. Die gespeicherten Parameter sowie die Prädiktionsgüte, dargestellt als MSE_{Ob} , sind Tabelle 6-3 zu entnehmen.

Tabelle 6-3: Ausgewählte Modellparameter

Name des Parameters	Modellparameter und Modellgüte
Max_depth	100
Max_features	sqrt
N_estimators	1000
MSE_{Ob}	9204

Grundlegend war dabei festzuhalten, dass die Hyperparameteroptimierung eine Verbesserung des MSE_{Ob} erzielte. Jedoch musste auch festgestellt werden, dass der MSE_{Ob} einen hohen Wert aufweist. Dabei ist zu beachten, dass die Interpretation des MSE_{Ob} von verschiedenen Faktoren abhängt, zum Beispiel vom zugrunde liegenden Problem und den Skalierungen der Zielvariablen. Es gibt keinen festgelegten Schwellenwert, ab dem ein MSE_{Ob} als „gut“ oder „schlecht“ angesehen wird. Im hier beschriebenen Kontext kann der MSE_{Ob} als „moderat“ bezeichnet werden. Das bedeutet, dass die durchschnittliche quadratische Abweichung zwischen den vorhergesagten und den tatsächlichen Werten nicht vernachlässigbar ist, aber auch nicht hoch.

Nachdem die technischen Änderungen der Windenergie AG einheitlich beschrieben und Grundtypen zugeordnet waren sowie das Prädiktionsmodell anhand von Vergangenheitsdaten trainiert wurde, konnte die Bewertung der neuen technischen Änderungen erfolgen.

Für die Vorhersage des Änderungsaufwands für neue technischen Änderungen (siehe Anhang A3) wurden diese aus dem ERP-System der Windenergie AG extrahiert und entsprechend den in Kapitel 5.1 entwickelten Merkmalen und Ausprägungen einheitlich beschrieben. Anschließend wurde die Ähnlichkeit der beschriebenen Änderungen mit den Änderungsgrundtypen anhand von Jaccard-Koeffizienten bestimmt und jeweils der entsprechende Änderungsgrundtyp ermittelt und dem Datenmodell hinzugefügt. Hierauf aufbauend erfolgte mit der Anwendung des Prädiktionsmodells auf die neuen Änderungen der wesentliche Schritt der vorliegenden Arbeit. Hieraus ergaben sich Vorhersagen für die jeweiligen Aufwände, welche voraussichtlich mit der Umsetzung der technischen Änderungen bei der Windenergie AG einhergehen würden.

Basierend auf der Prädiktion der Aufwände sowie der Quantifizierung des Nutzens der einzelnen Aufwände konnte in einem nächsten Schritt die Wirtschaftlichkeit der einzelnen Änderungen ermittelt werden (siehe Abbildung 6-3).

ID	Grundtyp	Vorhergesagter Änderungsaufwand	Nutzen	Wirtschaftlichkeit (Nutzen - Aufwand)
420	2	16.301 €	25.000 €	8.699 €
421	1	14.032 €	- €	- 14.032 €
422	1	12.911 €	5.000 €	- €
423	5	6.793 €	- €	- 6.793 €
424	2	22.811 €	20.000 €	- 2.811 €
425	4	13.337 €	- €	- 13.337 €
426	5	13.771 €	20.000 €	6.229 €
427	1	18.930 €	75.000 €	56.070 €
428	3	13.057 €	15.000 €	1.943 €
429	5	14.343 €	50.000 €	35.657 €
430	3	13.113 €	- €	- 13.113 €

Abbildung 6-3: Nutzen und Aufwand der neuen technischen Änderungen

6.2.4 Ableitung einer Umsetzungsempfehlung

Nachdem Aufwand und Nutzen der Einzeländerungen ermittelt wurden, folgte die Minimierung der Änderungskosten. Hierzu wurden die technischen Änderungen zu Änderungsbündeln zusammengefasst. Entsprechend dem in Kapitel 5.4 entwickelten Verfahren wurde zunächst die Änderungskombinationsmatrix erzeugt. Hieraus ergaben sich insgesamt 2048 Kombinationen. Aufgrund der Vielzahl der Kombinationen ist hier der hohe manuelle Aufwand zur Ermittlung der Aufwandsreduktionsfaktoren hervorzuheben. Dieser ist für jede Änderungskombination zu bestimmen. Anschließend wurde mittels Branch-and-Bound-Algorithmus diejenige Bündelkombination

ermittelt, welche insgesamt zu den geringsten Gesamtänderungsaufwänden führt. Der hierzu verwendete Algorithmus ist im Anhang dargestellt. Das Ergebnis der Bündelung ist Abbildung 6-4 zu entnehmen. Mithilfe der hier gezeigten Daten konnte eine Umsetzungsempfehlung entsprechend den in Teilkapitel 5.5.2 erläuterten Voraussetzungen abgeleitet werden.

ÄK	IDs	Änderungsbündelkosten	Nutzen	Wirtschaftlichkeit (Nutzen – Aufwand)
13	427,428	31.988 €	90.000 €	58.012 €
148	423,426,429,430	48.020 €	70.000 €	21.980 €
545	421,425	27.369 €	- €	-27.369 €
1345	420,422,424	52.023 €	50.000 €	-2.023 €

Abbildung 6-4: Bewertete Änderungsbündel

Als Umsetzungsempfehlung ergab sich somit, dass die Änderungen mit den IDs 427 und 428 als ein Release gemeinsam durchgeführt werden sollten. Basierend auf den gegebenen Daten konnte so eine wirtschaftliche Änderung erzielt werden. Analog dazu war ein Release, welches die IDs 423, 426, 429 und 430 enthält, ebenfalls als wirtschaftlich anzusehen. Die restlichen Änderungen sind von einem wirtschaftlichen Standpunkt betrachtet nicht sinnvoll.

6.3 Kritische Reflexion der Anwendungserfahrung

Die Anwendung der Methodik in Unterkapitel 6.2 zeigt, dass der im Zuge der Dissertation entwickelte Ansatz in der Praxis anwendbar ist. Er bildet dabei eine Unterstützung bei der Bewertung von technischen Änderungen für den Anwender. Im Folgenden werden die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik aus Teilkapitel 4.2.1 kritisch reflektiert.

Die inhaltlichen Anforderungen an die Methodik können durch die Validierung als erfüllt angesehen werden. Das formulierte Ziel der Arbeit, die Ableitung einer Umsetzungsempfehlung zur Minimierung des Gesamtänderungsaufwands von technischen Änderungen, konnte erreicht werden, wobei für die Vorhersage des Aufwands der Einzeländerungen prädiktive Datenanalyse genutzt wurde. Hierzu wurden technische Änderungen anhand eines Beschreibungsmodells eingeordnet und mittels Grundtypen typisiert.

Die in Teilkapitel 4.2.2 dargestellten formalen Anforderungen an die Methodik sind ebenfalls erfüllt. Die formale Richtigkeit und Widerspruchsfreiheit kann durch die Vorgehensweise der Validierung bestätigt werden. Die empirische Richtigkeit ist ge-

geben, da eine hinreichende Übereinstimmung zwischen Modell und Realität nachgewiesen wurde. Durch den Modellaufbau in einer gebräuchlichen Programmiersprache sind die Nutzerfreundlichkeit des Modells sowie die Zweckbezogenheit ebenfalls sichergestellt. Eine vollständige Integration der Schritte in ein einziges Tool ist als weiterer Schritt möglich, um die manuellen Aufwände der Nutzer zusätzlich zu reduzieren. Dies würde die Wirksamkeit der Methodik ebenfalls weiter verbessern.

Im Rahmen der Anwendung der Methodik sind darüber hinaus ergänzende Optimierungsmöglichkeiten und Erkenntnisse hinsichtlich der Methodik entstanden. Die Extraktion der Trainingsdaten aus den IT-Systemen und die manuelle Zuordnung der Merkmalsausprägungen des Beschreibungsmodells erfordern insbesondere bei großen Datenmengen einen hohen manuellen Aufwand. Daher sollten die entsprechenden Beschreibungsmerkmale und deren Ausprägungen direkt in das IT-System integriert werden, so dass bereits beim Erstellen eines neuen Änderungsantrags die Daten mit ausgefüllt werden müssen. Ein hoher manueller Aufwand tritt auch bei der Bewertung der Änderungsreduktionsfaktoren für die Änderungsbündel auf. Eine Automatisierung oder Vereinfachung dieses Vorgangs würde die Anwendbarkeit der Methodik deutlich verbessern. Weiterhin kann die Durchgängigkeit des Modells durch eine bessere Integration der einzelnen Algorithmen in ein einzelnes Tool insbesondere das manuelle Speichern und Neueinlesen der Datenzwischenstände verbessern. Neben einer geringeren Fehleranfälligkeit kann somit auch der Aufwand der Vorhersage von Änderungsaufwänden verbessert werden. Ein weiterer Faktor, um die Qualität der Vorhersage zu verbessern, ist die Steigerung der Datenqualität der Inputdaten. Bei einer Vielzahl von den Änderungen zugeordneten Aufwänden wurden Unsicherheiten hinsichtlich der echten Aufwände geäußert. Dies liegt an der manuellen Buchung der Aufwände auf einen Auftrag durch die Mitarbeitenden, welche ebenfalls als fehleranfällig angesehen werden muss. Zuletzt war die Menge der nutzbaren Änderungen insbesondere innerhalb des Validierungsbeispiels gering. Hierdurch konnten zwar die prinzipielle Funktionalität des Vorgehens und die Möglichkeit der Vorhersage und Minimierung von Änderungsaufwänden gezeigt werden, jedoch ist eine deutliche Verbesserung der Güte bei der Vorhersage der Aufwände anzustreben.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Produzierende Unternehmen sehen sich beim Management von Änderungen entlang des Produktentstehungsprozess mit einer Vielzahl an Herausforderungen konfrontiert. Starke Marktdynamiken und die Verkürzung von Produktlebenszyklen verschärfen diese Herausforderungen zunehmend. Vor diesem Hintergrund sowie angesichts des zunehmenden Wandels des Marktes von einem Verkäufer- zu einem Käufermarkt ist die effektive und effiziente Bearbeitung von technischen Änderungen heute eine Pflichtaufgabe. Dabei werden jedoch i.d.R. noch keine modernen Datenanalyseverfahren wie der Random Forest Algorithmus zur Prognose eingesetzt.

Bezugnehmend auf die beschriebene Ausgangssituation war die effiziente Gestaltung des Umgangs mit technischen Änderungen das Ziel dieser Arbeit. Dazu zählen insbesondere die Auswahl der zu bearbeitenden technischen Änderungen sowie eine Minimierung der Gesamtänderungskosten durch die Bündelung von technischen Änderungen mit ähnlicher Ressourcenbeanspruchung. Die Methodik fokussierte dabei die Zuordnung technischer Änderungen mittels eines Beschreibungsmodells und die Ermittlung von Grundtypen technischer Änderungen. Weiterhin erfolgte die Beschreibung von Aufwand und Nutzen technischer Änderungen, wobei der Aufwand durch prädiktive Datenanalyse ermittelt wurde. Abschließend wurden die technischen Änderungen zur Minimierung des Gesamtänderungsaufwands gebündelt.

In Kapitel 1 dieser Arbeit wurde die Motivation der Arbeit vorgestellt und daraus folgend wurde die Zielsetzung abgeleitet. Außerdem wurden die Forschungskonzeption und der Aufbau der Arbeit erläutert.

In Kapitel 2 wurden die relevanten Grundlagen und Definitionen eingeführt. Hierzu wurden der Objektbereich und der Zielbereich sowie die Lösungshypothese der Arbeit entwickelt. Dabei wurde zuerst das technische Änderungsmanagement als Teil der Produktentwicklung beschrieben, um anschließend die Bedeutung technischer Änderungen hervorzuheben. Weiterhin erfolgten die Beschreibung von technischen Änderungen sowie die Einführung in Kosten und Nutzen technischer Änderungen. Die Beschreibung der prädiktiven Datenanalyse und die Möglichkeit der Bündelung technischer Änderungen vervollständigten die Beschreibung von Objektbereich, Zielbereich und Lösungshypothese.

In Kapitel 3 wurden Theorie- und Praxisdefizite ermittelt, um die Relevanz der Arbeit sicherzustellen. Als Theoriedefizit ist dabei hervorzuheben, dass keine Ansätze be-

kannt sind, welche Prognoseverfahren wie den Random Forest Algorithmus zur Ermittlung des Aufwands von technischen Änderungen nutzen. Auch aus der Praxis ist eine Methode zur Nutzung der vorhandenen Daten durch maschinelles Lernen nicht bekannt. Eine bessere Vorhersage ermöglicht eine bessere Abschätzung der Wirtschaftlichkeit der technischen Änderungen. Damit jedoch ein Random Forest Algorithmus eingesetzt werden kann, müssen technischen Änderungen für diesen Anwendungszweck beschrieben werden.

Die Erkenntnisse der ersten Kapitel wurden in Kapitel 4 genutzt, um die Methodik zu konzipieren. Hierzu wurde ein Zielbild entworfen und die formalen und inhaltlichen Anforderungen an die Methodik wurden definiert. Das daran angelehnte Grobkonzept beschreibt die notwendigen methodischen Schritte, anhand deren die notwendigen Teilmodelle abgeleitet wurden.

In Kapitel 5 folgte die Detaillierung der Methodik zur Bewertung technischer Änderungen mittels prädiktiver Datenanalyse. Um eine Minimierung des Gesamtänderungsaufwands, basierend auf prädiktiver Datenanalyse und Grundtypen technischer Änderungen, zu erreichen, wurde zunächst ein Beschreibungsmodell technischer Änderungen entwickelt. Anschließend wurden Grundtypen technischer Änderungen abgeleitet. Es folgte die Beschreibung von Nutzen und Aufwand technischer Änderungen, bevor das Modell zur Aufwandsabschätzung für technische Änderungen entwickelt wurde. Durch Bündelung technischer Änderungen konnte der Änderungsaufwand minimiert und eine Umsetzungsempfehlung abgeleitet werden.

Zur Sicherstellung der Anwendbarkeit der Methodik wurde in Kapitel 6 eine Validierung der Methodik durchgeführt. Die hier gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend kritisch reflektiert und weitere Optimierungspotenziale für die Methodik wurden entwickelt. Auf dieser Basis wurde der weitere Forschungsbedarf in diesem Themengebiet identifiziert.

Zur Verbesserung der Vorhersage können bspw. weitere oder auch neue, heute noch nicht vorhandene Algorithmen genutzt werden. Verbesserungen können zum Beispiel eine höhere Prognosegüte, aber auch geringere Aufwände zur Anwendung des Algorithmus sein. Neben dem Algorithmus selbst sind jedoch insbesondere die Datenverfügbarkeit und die Datenqualität in der Praxis verbesserungswürdig. Weiterhin ist die Anwendung des Algorithmus nicht auf technische Änderungen beschränkt. Mittels geeigneter Beschreibungsmodelle und passender Inputvariablen können auch Vorhersagen zu weiteren entwicklungs- und produktionsbezogenen Tätigkeiten getroffen werden, wie beispielsweise dem Gesamtentwicklungsaufwand von Entwicklungsprojekten.

Literaturverzeichnis

- Ahmad, A.; Khan, S.*, 2019, Survey of State-of-the-Art Mixed Data Clustering Algorithms, In: IEEE Access, 7. Jg., S. 31883-31902.
- Ahmad, N.; Wynn, D. C.; Clarkson, P. J.*, 2009, Estimating the Process Cost of Implementing Engineering Change Alternatives, Göteborg.
- Alblas, A.; Wortmann, J.*, 2012, Managing large engineering changes, In: International Journal of Operations & Production Management, Nr. 11, 32. Jg., S. 1252-1280.
- Aleksic, S.*, 2015, Nachhaltige Weiterentwicklung von modularen Produktarchitekturen durch Release-Management, Apprimus Verlag, Aachen.
- Alpar, P.; Niedereichholz, J.*, 2000, Data Mining im praktischen Einsatz, Verfahren und Anwendungsfälle für Marketing, Vertrieb, Controlling und Kundenunterstützung, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- Alpaydin, E.*, 2010, Introduction to machine learning, MIT Press, Cambridge.
- Arica, E.; Bakaas, O.; Sriram, P.*, 2016, A Taxonomy for Engineering Change Management in Complex ETO Firms, In: International Journal of Operations & Production Management, Nr. 3, 36. Jg., S. 285-289.
- Armstrong, J. S.*, 2001, Principles of forecasting, A handbook for researchers and practitioners, Kluwer Academic, Boston MA.
- Aßmann, G.*, 2014, Gestaltung von Änderungsprozessen in der Produktentwicklung, Herbert Utz Verlag, München.
- Augustin, M.*, 2015, Kooperatives Änderungsmanagement, DVV Media Group GmbH, Hamburg.
- Aurich, J.; Rößing, M.*, Engineering Change Impact Analysis in Production Using VR, 2007, In: Cunha, P. F.; Maropoulos, P. G. (Hrsg.) Digital Enterprise Technology, Springer US, Boston, MA, S. 75-82.
- Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.*, 2016, Multivariate Analysemethoden, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Backus, P.; Janakiram, M.; Mowzoon, S.; Runger, G.; Bhargava, A.*, 2006, Factory Cycle-Time Prediction With a Data-Mining Approach, In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Nr. 2, 19. Jg., S. 252-258.
- Bailey, K. D.*, 1994, Typologies and taxonomies, An introduction to classification techniques, Sage Publications, Thousand Oaks.

- Balakrishnan, N.; Chakravarty, A.*, 1996, Managing Engineering Change: Market Opportunities and Manufacturing Costs, In: Production and Operations Management, Nr. 4, 5. Jg., S. 335-356.
- Becerril, L.; Sauer, M.; Lindemann, U.*, 2016, Estimating the effects of Engineering Changes in early stage product development.
- Becker, W.; Ulrich, P.; Stradtman, M.*, Systematische Literaturanalyse, 2018, In: Becker, W.; Ulrich, P.; Stradtman, M. (Hrsg.) Geschäftsmodellinnovationen als Wettbewerbsvorteil mittelständischer Unternehmen, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, S. 75-97.
- Belener, P. M.*, 2008, Technisches Änderungsmanagement modularer Produkte und Prozesse, Shaker, Aachen.
- Bender, B.; Gericke, K.*, Entwicklungsprozesse, 2016, In: Lindemann, U. (Hrsg.) Handbuch Produktentwicklung, Hanser, Carl, München, S. 399-424.
- Bender, B.; Steven, M.*, 2015, Erfolgsindikatoren in der technischen Produktentwicklung, In: Die Unternehmung, Nr. 4, 69. Jg., S. 354-370.
- Bholowalia, P.; Kumar, A.*, 2014, EBK-Means: A Clustering Technique based on Elbow Method and K-Means in WSN, In: International Journal of Computer Applications, Nr. 9, 105. Jg., S. 17-24.
- Binder, V. A.; Kantowsky, J.*, 1996, Technologiepotentiale, Neuausrichtung der Gestaltungsfelder des Strategischen Technologiemanagements, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Boehm, B.*, 1988, A spiral model of software development and enhancement, In: Computer, Nr. 5, 21. Jg., S. 61-72.
- Borjesson, F.; Hölltä-Otto, K.*, 2012, Improved Clustering Algorithm for Design Structure Matrix.
- Borjesson, F.; Hölltä-Otto, K.*, 2014, A module generation algorithm for product architecture based on component interactions and strategic drivers, In: Research in Engineering Design, Nr. 1, 25. Jg., S. 31-51.
- Borrego, M.; Foster, M.; Froyd, J.*, 2014, Systematic Literature Reviews in Engineering Education and Other Developing Interdisciplinary Fields, In: Journal of Engineering Education, Nr. 1, 103. Jg., S. 45-76.
- Bosser, H.*, 2004, Systeme, Dynamik, Simulation, Modellbildung, Analyse und Simulation komplexer Systeme,, Norderstedt.
- Breiman, L.*, 1996, Bagging predictors, In: Machine Learning, Nr. 2, 24. Jg., S. 123-140.

- Breiman, L.*, 2001, Random Forrest, In: Machine Learning, Nr. 1, 45. Jg., S. 5-32.
- Breiman, L.; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J.*, 1984, CART: Classification and Regression Trees, Belmont.
- Brell, C.; Brell, J.; Kirsch, S.*, 2017, Statistik von Null auf Hundert, Mit Kochrezepten schnell zum Statistik-Grundwissen, Springer Spektrum, Berlin.
- Bronner, A.*, 1996, Angebots- und Projektkalkulationen, Leitfaden für technische Betriebe, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Brownlee, J.*, 2017, Master Machine Learning Algorithms. URL: <https://machinelearningmastery.com/master-machine-learning-algorithms/single-faq/can-i-get-the-isbn-for-your-book/> 14.07.2023.
- Bruns, M.*, 1991, Systemtechnik, Springer, Berlin.
- Chakraborty, D.; Elhegazy, H.; Elzarka, H.; Gutierrez, L.*, 2020, A novel construction cost prediction model using hybrid natural and light gradient boosting, In: Advanced Engineering Informatics, 46. Jg., S. 101201.
- Chamoni, P.; Gluchowski, P.*, 2006, Analytische Informationssysteme, Business intelligence-technologien und -anwendungen, Springer, Berlin.
- Chang, A.; Shih, J.; Choo, Y.*, 2011, Reasons and costs for design change during production, In: Journal of Engineering Design, Nr. 4, 22. Jg., S. 275-289.
- Chapman, P.; Clinton, J.; Kerber, R.; Khabaza, T.; Reinartz, T.; Shearer, C.; Wirth, R.*, 2000, CRISP-DM 1.0, Step-by-step data mining guide.
- Charalampos, D.*, 2017, Planungsleitfaden für die systematische Analyse- und Verbesserung von Produktarchitekturen, Technische Universität München.
- Chen, Y.-M.; Shir, W.-S.; Shen, C.-Y.*, 2002, Distributed engineering change management for allied concurrent engineering, In: International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Nr. 2, 15. Jg., S. 127-151.
- Chollet, F.; Lorenzen, K.*, 2018, Deep Learning mit Python und Keras, EBSCO Industries, Frechen, Ipswich, Massachusetts.
- Cios, K. J.; Pedrycz, W.; Swiniarski, R. W.; Kurgan, L. A.*, 2007, Data Mining, A Knowledge Discovery Approach, Springer US; Imprint: Springer, New York NY.
- Conrat Niemerg, J.*, 1997, Änderungskosten in der Produktentwicklung, Dissertation, Technische Universität München.
- Cooper, R.*, 1990, Stage-gate systems - A new tool for managing new products, In: Business Horizons, Nr. 3, 33. Jg., S. 44-54.
- Cutler, A.; Cutler, D. R.; Stevens, J. R.*, 2012, Random Forests, Springer US, Boston, MA.

- Dabab, M.; Freiling, M.; Rahman, N.; Sagalowicz, D.*, 2018, A Decision Model for Data Mining Techniques, PICMET'18 : Portland International Conference on Management of Engineering and Technology.
- Deubzer, F.; Kreimeyer, M.; Junior, T.; Rock, B.*, 2005, Der Änderungsmanagement Report 2005, In: CiDaD Working Paper Series, Nr. 01, Nr.01/05, S. 1-12.
- Deutsches Institut für Normung ,1988 DIN ISO 6772:2018-08
DIN ISO 6772., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1988.
- Deutsches Institut für Normung ,1990 DIN 6789-3:1990-09
DIN 6789-3., Beuth Verlag GmbH, Berlin 1990.
- Deutsches Institut für Normung ,2015 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe
DIN EN ISO 9000., Beuth Verlag GmbH, Berlin 2015.
- Dietrich, E.; Schulze, A.*, 2014, Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation, Hanser, Carl, München.
- Dölle, C.*, 2018, Projektsteuerung in der Produktentwicklung mittels Predictive Analytics, Dissertation, RWTH Aachen.
- Dyckhoff, H.; Spengler, T.*, 2010, Produktionswirtschaft, S. 24.
- Easterby-Smith, M.; Thorpe, R.; Jackson, P. R.*, 2012, Management research, Sage Publ, Los Angeles.
- Eckert, C.; Clarkson, J.; Earl, C.*, 2005, Predictabilty of Change in Engineering: A Complexity View.
- Eckert, C.; Clarkson, P. J.; Zanker, W.*, 2004, Change and customisation in complex engineering domains, Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, Hanser, München.
- Eckey, H.-F.*, 2002, Multivariate Statistik, Gabler, Wiesbaden.
- Ehrlenspiel, K.; Kiewert, A.; Lindemann, U.; Mörtl, M.*, 2014, Kostengünstig Entwickeln und Konstruieren, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H.*, 2013, Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, Hanser, München [u.a.].
- Eisenberg, H.*, 2004, Statistische Methoden des Data Mining und deren Anwendung. .
- ElMaraghy, H.; Schuh, G.; ElMaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A.*, 2013, Product variety management, In: CIRP Annals, Nr. 2, 62. Jg., S. 629-652.

- Elmousalami, H.*, 2021, Comparison of Artificial Intelligence Techniques for Project Conceptual Cost Prediction: A Case Study and Comparative Analysis, In: IEEE Transactions on Engineering Management, Nr. 1, 68. Jg., S. 183-196.
- Eppinger, S. D.; Browning, T. R.*, 2012, Design structure matrix methods and applications, MIT Press, Cambridge, Mass.
- Ester, M.; Sander, J.*, 2000, Knowledge Discovery in Databases, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Eversheim, W.; Warnke, L.; Schröder, T.*, 1997, Änderungsmanagement in Entwicklungskooperationen, In: VDI-Z, Nr. 3, 139. Jg., S. 60-63.
- Facciano, C.; Holmes, A.*, 2016, Data Driven Big Decisions in the Intelligence Age.
- Fan, J.; Han, F.; Liu, H.*, 2014, Challenges of Big Data Analysis, In: National science review, Nr. 2, 1. Jg., S. 293-314.
- Fang, Y.; Guo, X.; Chen, J.*, 2012, Research of Engineering Change Analysis, In: Advanced Materials Research, 542-543, S. 285-288.
- Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; Padhraic, S.*, 1996, From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases, In: AI Magazine, Nr. 17, S. 37-54.
- Feldhusen, J.; Grote, K.-H.*, 2013, Pahl/Beitz Konstruktionslehre, Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Fink, A.; Kliewer, N.; Mattfeld, D.; Mönch, L.; Rothlauf, F.; Schryen, G.; Suhl, L.; Voß, S.*, 2014, Modellbasierte Entscheidungsunterstützung in Produktions- und Dienstleistungsnetzwerken, In: Wirtschaftsinformatik, Nr. 1, 56. Jg., S. 21-29.
- Fink, A.; Siebe, A.*, 2016, Szenario-Management, Von strategischem Vorausdenken zu zukunftsrobusten Entscheidungen, Campus Verlag, Frankfurt, New York.
- Frese, E.; Graumann, M.; Talaulicar, T.; Theuvsen, L.*, 2019, Grundlagen der Organisation, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Freund, Y.; Schapire, R.*, 1997, A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting, In: Journal of Computer and System Sciences, Nr. 1, 55. Jg., S. 119-139.
- Fricke, E.; Gebhard, B.; Negele, H.; Igenbergs, E.*, 2000, Coping with changes, Causes, findings, and strategies, In: Systems Engineering, Nr. 4, 3. Jg., S. 169-179.
- Friedl, G.; Hofmann, C.; Pedell, B.*, 2017, Kostenrechnung, Eine entscheidungsorientierte Einführung, Verlag Franz Vahlen, München.
- Gabriel, A.*, 2001, Redesignit -A Constraint-Based Tool for Managing Design Changes, ASME 2001 Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.

- Gausemeier, J.; Plass, C.*, 2014, Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, Strategien, Geschäftsprozesse und IT-Systeme für die Produktion von morgen, Hanser, München.
- Gebhardt, M.*, 2018, Kostenkalkulation im Kontext technischer Produktänderungen, Entwicklung und Evaluation eines kausalanalytischen Ansatzes zur Prognose indirekter Änderungskosten, Nomos Verlagsgesellschaft, Baden-Baden.
- Gemmerich, M.*, 1995, Technische Produktänderungen, Betriebswirtschaftliche und empirische Modellanalyse, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Gemmerich, M.*, 1995, Technische Produktänderungen, Betriebswirtschaftliche und empirische Modellanalyse, Deutscher Universitätsverlag; Imprint, Wiesbaden.
- Gentsch, P.*, 2018, Künstliche Intelligenz für Sales, Marketing und Service, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Gille, C.*, 2013, Gestaltung von Produktänderungen im Kontext hybrider Produkte, Kostenanalyse am Beispiel der Groß- und Kleinserienfertigung im Maschinenbau, Springer Gabler, Wiesbaden.
- Gilsdorf, E. A.*, 2011, Semantic annotation of product safety information.
- Gladen, W.*, 2001, Kennzahlen- und Berichtssysteme, Grundlagen zum Performance Measurement, Gabler Verlag, Wiesbaden.
- Grieco, A.; Pacella, M.; Blaco, M.*, 2017, On the Application of Text Clustering in Engineering Change Process, In: *Procedia CIRP*, 62. Jg., S. 187-192.
- Gusenbauer, M.*, 2018, Google Scholar to overshadow them all? Comparing the sizes of 12 academic search engines and bibliographic databases, In: *Scientometrics*.
- Hall, P.; Phan, W.; Whitson, K.*, 2016, *The Evolution of Analytics*, O'Reilly Media Inc, Sebastopol.
- Hamraz, B.*, 2013, *Engineering Change Modelling Using a Function-Behaviour-Structure Scheme*, Apollo - University of Cambridge Repository, Cambridge.
- Hamraz, B.; Caldwell, N.; Clarkson, P.*, 2013, A Holistic Categorization Framework for Literature on Engineering Change Management, In: *Systems Engineering*, Nr. 4, 16. Jg., S. 473-505.
- Haric, P.; Berwanger, J.*, 2019, Stichwort Unternehmen. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/unternehmen-48087/version-369159> 14.07.23.
- Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J. H.*, 2017, *The elements of statistical learning, Data mining, inference, and prediction*, Springer, New York, NY.
- Hill, R.*, 2016, What an Algorithm Is, In: *Philosophy & Technology*, Nr. 1, 29. Jg., S. 35-59.

- Ho, T. K.*, 1995, Random decision forests.
- Homburg, C.*, 2017, Marketingmanagement, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- Horngren, C. T.; Foster, G.; Datar, S. M.*, 2000, Cost accounting, A managerial emphasis, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Huang, G.; Mak, K.*, 1999, Current practices of engineering change management in UK manufacturing industries, In: International Journal of Operations & Production Management, Nr. 1, 19. Jg., S. 21-37.
- Inness, J.*, 1994, Achieving successful product change, London.
- International Organization for Standardization ,2013 Information technology, Service management
ISO/IEC 20000-1:2011. 2013.
- Internationale Organisation für Normung ,2020 Industrial automation systems and integration
ISO ISO/DIS 10303-1. 2020.
- Iris Gräßler, D. W.*, 2021, Systematische Bewertung von Auswirkungsanalysen des Engineering Change Managements.
- Jank, M.-H.; Dölle, C.; Schuh, G.*, Product Portfolio Design Using Prescriptive Analytics, 2019, In: Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.) Advances in Production Research, Springer International Publishing, Cham, S. 584-593.
- Jarratt, T.; Clarkson, J.; Eckert, C.*, 2005, Engineering change management // Design process improvement, A review of current practice, Springer-Verlag London Limited, London.
- Jarratt, T.; Eckert, C.; Caldwell, N.; Clarkson, P.*, 2011, Engineering change, An overview and perspective on the literature, In: Research in Engineering Design, Nr. 2, 22. Jg., S. 103-124.
- Kaiser, H.*, 1993, Erfolgreiche Organisation im technischen Änderungsdienst, Techno Congress, München.
- Kalousis, A.; Hilario, M.*, Supervised knowledge discovery from incomplete data, 2000, In: Ebecken, N. F. F.; Brebbia, C. A. (Hrsg.) Data mining II, WIT Press, Southampton, S. 269-277.
- Kattner, N.; Mehlstaubl, J.; Becerril, L.; Lindemann, U.*, 2018, Data Analysis in Engineering Change Management – Improving Collaboration by Assessing Organizational Dependencies Based on Past Engineering Change Information.

- Kattner, N.; Shakirov, E.; Lindemann, U.*, An Approach to Assess Engineering Change Effort Retrospectively Utilizing Past Engineering Change Information, 2019, In: Fortin, C.; Rivest, L.; Bernard, A.; Bouras, A. (Hrsg.) Product Lifecycle Management in the Digital Twin Era, Springer International Publishing, Cham, S. 223-232.
- Kelle, U.; Kluge, S.*, 2010, Vom Einzelfall zum Typus, Fallvergleich und Fallkontrastierung in der qualitativen Sozialforschung, VS Verl. für Sozialwiss, Wiesbaden.
- Kellner, F.; Lienland, B.; Lukesch, M.*, 2020, Produktionswirtschaft, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Kim, K. J.; Kim, H.*, 2017, Mobile and Wireless Technology 2018, Towards a Methodology to Investigate the Efficiency of Handling Engineering Changes.
- Kissel, M.; Lindemann, U.*, 2013, System architecture change decisions in multi-variant product portfolios, In: Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED, 4. Jg., S. 11-20.
- Kluge, S.*, 1999, Empirisch begründete Typenbildung, Zur Konstruktion von Typen und Typologien in der qualitativen Sozialforschung, Leske und Budrich, Opladen.
- Knack, R.*, 2006, Betriebswirtschaftslehre für Technologie und Innovation, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden.
- Knuth, D. E.*, 1997, Art Of Computer Programming, Volume 1: Fundamental Algorithms (3rd Edition), Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ.
- Koch, J.; Brandl, F.; Hofer, A.; Reinhart, G.*, 2015, Studie: Änderungsmanagement in der Produktion.
- Köhler, C.*, 2010, Technische Produktänderungen, Analyse und Beurteilung von Lösungsmöglichkeiten auf Basis einer Erweiterung des CPM/PDD-Ansatzes, Univ. des Saarlandes Lehrstuhl für Fertigungstechnik, Saarbrücken.
- Korthals, K.*, 2014, Wertstromanalyse in der Produktentwicklung, Apprimus-Verlag, Aachen.
- Kosow, H.; Gaßner, R.; Erdmann, L.*, 2008, Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse, Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien, IZT, Berlin.
- Kotsiantis, S.*, 2007, Supervised Machine Learning: A Review of Classification Techniques, In: Informatica, 31. Jg., S. 249-268.
- KPMG*, 2017, Mit Daten Werte schaffen.
- Krause, D.; Gebhardt, N.*, 2018, Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien., Springer Vieweg, Berlin.

- Kubicek, H.*, Heuristische Bezugsrahmen und heuristisch angelegte Forschungsdesigns als Elemente der Konstruktionsstrategie empirischer Forschung, 1977, In: Köhler, R. 1.-2. (Hrsg.) Empirische und handlungstheoretische Forschungskonzeptionen in der Betriebswirtschaftslehre, Poeschel, Stuttgart, S. 3-36.
- Kuckartz, U.*, 2010, Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten,, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Kuckartz, U.*, Sozialwissenschaftliche Ansätze für die kategorienbasierte Textanalyse, 2010, In: Kuckartz, U. (Hrsg.) Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, S. 72-107.
- Kuckartz, U.*, 2016, Qualitative Inhaltsanalyse, Methoden, Praxis, Computerunterstützung, Beltz Juventa, Weinheim.
- Kuhn, T.*, 2001, Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen, Suhrkamp, Berlin.
- Kühnapfel, J. B.*, 2019, Die Macht der Vorhersage, Smarter leben durch bessere Prognosen, Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer, Wiesbaden.
- Kurgan, L.; Musilek, P.*, 2006, A survey of Knowledge Discovery and Data Mining process models, In: The Knowledge Engineering Review, Nr. 1, 21. Jg., S. 1-24.
- Lachnit, L.; Müller, S.*, 2012, Unternehmenscontrolling: Managementunterstützung bei Erfolgs-, Finanz-, Risiko- und Erfolgspotenzialsteuerung // Unternehmenscontrolling, Managementunterstützung bei Erfolgs-, Finanz-, Risiko- und Erfolgspotenzialsteuerung, Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Gabler, Wiesbaden.
- Langer, S.*, Änderungsmanagement, 2016, In: Lindemann, U. (Hrsg.) Handbuch Produktentwicklung, Hanser, Carl, München, S. 513-539.
- Langer, S.; Wilberg, J.; Maier, A.; Lindemann, U.*, 2012, Änderungsmanagement-Report 2012, Studienergebnisse zu Ursachen und Auswirkungen, aktuellen Praktiken, Herausforderungen und Strategien in Deutschland.
- Lee, H.; Ahn, H.; Kim, J.; Park, S.*, 2007, Capturing and reusing knowledge in engineering change management, In: Information Systems Frontiers, Nr. 5, 8. Jg., S. 375-394.
- Lenders, M.*, 2009, Beschleunigung der Produktentwicklung durch Lösungsraum-Management, Dissertation, RWTH Aachen.
- Lindemann, U.*, 2016, Handbuch Produktentwicklung,, Hanser, Carl, München.
- Lindemann, U.; Kleedörfer, R.; Gerst, M.*, 1998, The Development Department and Engineering Change Management.

- Lindemann, U.; Reichwald, R.*, 1998, Integriertes Änderungsmanagement, Springer, Berlin Heidelberg.
- Loyer, J.-L.; Henriques, E.; Fontul, M.; Wiseall, S.*, 2016, Comparison of Machine Learning methods applied to the estimation of manufacturing cost of jet engine components, In: International Journal of Production Economics, 178. Jg., S. 109-119.
- Mannila, H.*, 1996, Data mining: machine learning, statistics, and databases, In: Proceedings of 8th International Conference on Scientific and Statistical Data Base Management, S. 2-8.
- Mattern, C.*, 2018, Steigerung der Kollaborationsproduktivität in der interdisziplinären Produktentwicklung, Apprimus-Verlag, Aachen.
- Mauerer, J.*, 2018, Predictive Analytics Studie.
- Mehra, C.*, 2010, Knowledge-based Methods for Evaluation of Engineering Changes.
- Mehra, C.; Patil, L.; Dutta, D.*, 2013, An Approach to Determine Important Attributes for Engineering Change Evaluation, In: Journal of Mechanical Design, Nr. 4.
- Meidan, Y.; Lerner, B.; Rabinowitz, G.; Hassoun, M.*, 2011, Cycle-Time Key Factor Identification and Prediction in Semiconductor Manufacturing Using Machine Learning and Data Mining, In: IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, Nr. 2, 24. Jg., S. 237-248.
- Meyer, U. B.; Creux, S. E. M.; Weber Marin Silva, A. K.*, 2005, Grafische Methoden der Prozessanalyse, Für Design und Optimierung von Produktionssystemen, Hanser, München, Wien.
- Mietzner, D.*, 2009, Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen, Methodenevaluation und neue Ansätze, Gabler Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.
- Mißler-Behr, M.*, 1993, Methoden der Szenarioanalyse, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Müller, R. M.; Lenz, H.-J.*, 2013, Business Intelligence, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Müller-Benedict, V.*, 2007, Grundkurs Statistik in den Sozialwissenschaften, Eine leicht verständliche, anwendungsorientierte Einführung in das sozialwissenschaftlich notwendige statistische Wissen, VS Verl. für Sozialwissenschaften, Wiesbaden.
- Niebler, P.; Lindner, D.*, 2019, Datenbasiert entscheiden, Ein Leitfaden für Unternehmer und Entscheider, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

- Oh, G.; Hong, Y.*, Change propagation management by active batching, 2017, In: Maier, A.; Kim, H.; Oehmen, J.; Salustri, F.; Škec, S.; Kokkolaras, M. (Hrsg.) Design methods and tools, Curran Associates Inc, Red Hook, NY, S. 613-622.
- Omary, Z.; Mtenzi, F.*, 2010, Machine Learning Approach to Identifying the Dataset Threshold for the Performance Estimators in, In: International Journal for Infonomics, Nr. 3, 3. Jg., S. 314-325.
- Pal, S. K.; Mitra, P.*, 2004, Pattern recognition algorithms for data mining, Scalability, knowledge discovery and soft granular computing.
- Pan, Y.; Stark, R.*, 2022, An interpretable machine learning approach for engineering change management decision support in automotive industry, In: Computers in Industry, 138. Jg., S. 103633.
- Patzak, G.*, 1982, Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme, Grundlagen, Methoden, Techniken, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Paulukuhn, L.*, 2005, Typologisierung von Entwicklungsprojekten im Maschinenbau, Shaker, Aachen.
- Pham, H.; Olafsson, S.*, 2020, On Cesáro Averages for Weighted Trees in the Random Forest, In: Journal of Classification, Nr. 1, 37. Jg., S. 223-236.
- Pirra, R.*, 2015, Using enterprise architecture to guide application change management.
- Potdar, P.; Jonnalagedda, V.*, 2018, Design and development of a framework for effective engineering change management in manufacturing industries, In: International Journal of Product Lifecycle Management, Nr. 4, 11. Jg., S. 368-385.
- Pümpin, C.*, 1992, Das Dynamik-Prinzip, Zukunftsorientierungen für Unternehmer und Manager, ECON-Taschenbuch-Verl., Düsseldorf.
- Pümpin, C.; Amann, W.*, 2005, SEP, Strategische Erfolgspositionen; Kernkompetenzen aufbauen und umsetzen, Haupt, Bern.
- Ramesh, S.; Dursun, D.; Efrain, T.*, 2018, Business Intelligence, Analytics, and Data Science, A Managerial Perspective, Pearson, .
- Rebentisch, E.; Schuh, G.; Riesener, M.; Breunig, S.; Hoensbroech, F.*, 2017, Assessment of changes in engineering design using change propagation cost analysis, In: Proceedings of the 21st International Conference on Engineering Design (ICED17), S. 69-78.
- Riesener, M.; Doelle, C.; Mendl-Heinisch, M.; Schuh, G.*, 2019, Literature Based Derivation of a Framework to Evaluate Engineering Change Requests, S. 1-6.

- Riesener, M.; Dolle, C.; Mendl-Heinisch, M.; Schuh, G.*, 2021, Applying the Random Forest Algorithm to Predict Engineering Change Effort.
- Riesener, M.; Dölle, C.; Mendl-Heinisch, M.; Schuh, G.; Keuper, A.*, 2020, Derivation of description features for engineering change request by aid of latent dirichlet allocation, In: Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference, 1. Jg., S. 697-706.
- Rimscha, M. von*, 2017, Algorithmen kompakt und verständlich, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Ropohl, G.*, 2009, Allgemeine Technologie eine Systemtheorie der Technik, Universitätsverlag, Karlsruhe.
- Rowell, W.; Duffy, A.; Boyle, I.; Masson, N.*, 2009, The nature of engineering change in a complex product development cycle, S. 1-8.
- Royce, W.*, 1970, Managing the development of large software systems, In: Proc. IEEE WESTCON, Los Angeles, S. 1-9.
- Runkler, T. A.*, 2015, Data Mining, Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- Russell, S. J.; Norvig, P.*, 2010, Artificial intelligence, A modern approach, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.
- Sampietro, M.*, 2016, Team members and change requests, In: PM World Journal.
- Sauer mann, F.*, 2020, Datenbasierte Prognose und Planung auftragspezifischer Übergangszeiten, Databased prediction and planning of order-specific transition times, Apprimus Verlag, Aachen.
- Schietke, R. E.*, 2013, Pandemische Influenza in Deutschland 2020, Szenarien und Handlungsoptionen, Fraunhofer-Verl., Stuttgart.
- Schinzer, H. D.; Bange, C.; Mertens, H.*, 1999, Data warehouse und data mining, Marktführende Produkte im Vergleich, Vahlen, München.
- Schmalenbach, E.*, 1963, Kostenrechnung und Preispolitik, Westdt. Verlag, Köln/Op-laden.
- Schmidt-Hertha, B.; Tippelt, R.*, 2011, Typologien. URL: <http://www.die-bonn.de/id/9185> 14.07.2023.
- Schmitz, S.*, 2015, Gestaltungsmethodik für eine Produktstruktur variantenreicher rotationssymmetrischer Bauteile, Apprimus Verlag, Aachen.
- Schomburg, E.*, 1980, Entwicklung eines betriebstypologischen Instrumentariums zur systematischen Ermittlung der Anforderungen an EDV-gestützte Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme im Maschinenbau, Dissertation, RWTH Aachen.

- Schroeter, B.*, 2002, Operatives Controlling, Aufgaben, Objekte, Instrumente, Gabler Verlag, Wiesbaden.
- Schuh, G.*, 2012, Innovationsmanagement, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schuh, G.; Anderl, R.; Gausemeier, J.; Hompel, M. ten; Wahlster, W.*, 2017, Industrie 4.0 Maturity Index - Die digitale Transformation von Unternehmen gestalten.
- Schuh, G.; Dölle, C.*, 2021, Sustainable Innovation, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Schuh, G.; Guetzlaff, A.; Sauermann, F.; Krug, M.*, 2021, Data-based improvement of engineering change impact analyses in manufacturing, In: *Procedia CIRP*, 99. Jg., S. 580-585.
- Schuh, G.; Reinhart, G.; Prote, J.-P.; Sauermann, F.; Horsthofer, J.; Oppolzer, F.; Knoll, D.*, 2019, Data Mining Definitions and Applications for the Management of Production Complexity, In: *Procedia CIRP*, 81. Jg., S. 874-879.
- Schuh, G.; Riesener, M.*, 2018, Produktkomplexität managen, Strategien - Methoden - Tools, Hanser, München.
- Schuh, G.; Riesener, M.; Diels, F.*, 2016, Structuring highly iterative product development projects by using HIP-indicators.
- Schuh, G.; Riesener, M.; Dolle, C.*, 2016, Concept for development project management by aid of predictive analytics.
- Schultz, V.*, 1995, Projektkostenschätzung, Kostenermittlung in frühen Phasen von technischen Auftragsprojekten, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden.
- Schwarz-Geschka, M.*, 2021, INKA 4 - Die Software zur Entwicklung von Szenarien. URL: <https://szenariotechnik.com> 14.05.2021.
- Shankar, P.; Morkos, B.; Summers, J.*, 2012, Reasons for change propagation: a case study in an automotive OEM, In: *Research in Engineering Design*, Nr. 4, 23. Jg., S. 291-303.
- Shih, W.*, 1979, A Branch and Bound Method for the Multiconstraint Zero-One Knapsack Problem, In: *Journal of the Operational Research Society*, Nr. 4, 30. Jg., S. 369-378.
- Shögren, P.; Fagerström, B.; Kurdve, M.; Lechler, T.*, 2019, Opportunity discovery in initiated and emergent change requests, In: *Design Science*, 5. Jg.
- Sommerlatte, T.*, Technikgestaltung aus der Sicht des Nutzers, 2008, In: Roßnagel, A.; Sommerlatte, T.; Winand, U. (Hrsg.) *Digitale Visionen - Zur Gestaltung allgegenwärtiger Informationstechnologien*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, S. 177-184.

- Spath, D.; Dangelmaier, M.*, Produktentwicklung Quo Vadis, 2016, In: Lindemann, U. (Hrsg.) Handbuch Produktentwicklung, Hanser, Carl, München, S. 1-7.
- Specht, G.; Beckmann, C.; Amelingmeyer, J.*, 2002, F&E-Management, Kompetenz im Innovationsmanagement, Schäffer-Poeschel, Stuttgart.
- Stachowiak, H.*, 1973, Allgemeine Modelltheorie, Springer-Verlag, Wien New York.
- Stamm, H.; Schwarb, T.*, 1995, Metaanalyse, In: Zeitschrift für Personalforschung, Nr. 1, 9. Jg.
- Statistisches Bundesamt*, 2008, Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008), Wiesbaden.
- Strobl, C.; Malley, J.; Tutz, G.*, 2009, An Introduction to Recursive Partitioning: Rationale, Application and Characteristics of Classification and Regression Trees, Bagging and Random Forests, München.
- Tale-Yazdi, A.; Kattner, N.; Becerril, L.; Lindemann, U.*, 2018, A Literature Review on Approaches for the Retrospective Utilisation of Data in Engineering Change Management.
- Tan, P.-N.; Kumar, V.; Steinbach, M.*, 2005, Introduction to data mining, Pearson Addison Wesley, Boston.
- Turing, A.*, 1950, Computing Machinery and Intelligence, In: Mind, Nr. 236, LIX, S. 433-460.
- Ullah, I.; Tang, D.; Yin, L.*, 2016, Engineering Product and Process Design Changes: A Literature Overview, In: Procedia CIRP, 56. Jg., S. 25-33.
- Ulrich, H.*, 2001, Systemorientiertes Management, Haupt, Bern.
- Ulrich, H.; Dyllick, T.; Probst, G. J. B.*, 1984, Management, Haupt, Bern & Stuttgart.
- Ulrich, K.*, 1995, The role of product architecture in the manufacturing firm, In: Research Policy, Nr. 3, 24. Jg., S. 419-440.
- Ulrich, P.; Hill, W.*, 1976, Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre Teil 1, In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium : Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt, Nr. 7, S. 304-309.
- van Bertalanffy, L.*, 2003, General system theory, Foundations, development, applications, Braziller, New York.
- Verband der Automobilindustrie*, 2010, ECM Recommendation Part 0.
- Verband der Automobilindustrie*, 2010, ECM Recommendation Part 1.
- Verein Deutscher Ingenieure*, 1993, VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

- Verein Deutscher Ingenieure, 2004, VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme, In: VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Vester, F., 1999, Die Kunst vernetzt zu denken, Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; ein Bericht an den Club of Rome, Deutscher Taschenbuchverlag, München.
- Voigt, K., 2018, Definition Produktion. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produkt-42902/version-266242> 22.01.2019 - 11:00.
- Voigt, K., 2018, Stichwort Produkt. URL: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/produkt-42902/version-266242> 19.02.2018 - 14:37.
- Wasmer, A.; Staub, G.; Vroom, R., 2011, An industry approach to shared, cross-organisational engineering change handling - The road towards standards for product data processing, In: Computer-Aided Design, Nr. 5, 43. Jg., S. 533-545.
- Welter, M., 2006, Die Forschungsmethode der Typisierung, In: WiSt - Wirtschaftswissenschaftliches Studium, Nr. 2, 35. Jg., S. 113-116.
- Wickel, M., 2017, Änderungen besser managen - Eine datenbasierte Methodik zur Analyse technischer Änderungen, Dissertation, Technische Universität München.
- Wickel, M.; Chucholowski, N.; Behncke, F.; Lindemann, U., Comparison of Seven Company-Specific Engineering Change Processes, 2015, In: Schabacker, M.; Gericke, K.; Szélig, N.; Vajna, S. (Hrsg.) Modelling and Management of Engineering Processes, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, S. 125-136.
- Wilberg, J.; Tommelein, I. D.; Elezi, F.; Lindemann, U., 2015, Supporting the Implementation of Engineering Change Management with the Viable System Model.
- Wilms, F. E. P., 2006, Szenariotechnik, Vom Umgang mit der Zukunft, Haupt, Bern.
- Winston, P. H., 1993, Artificial intelligence, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- Witten, I. H.; Pal, C. J.; Frank, E.; Hall, M. A., 2017, Data mining, Practical machine learning tools and techniques, Morgan Kaufmann, Cambridge, MA.
- Wittpahl, V., 2019, Künstliche Intelligenz, Springer, Berlin, Heidelberg.
- Wu, X.; Kumar, V.; Ross Quinlan, J.; Ghosh, J.; Yang, Q.; Motoda, H.; McLachlan, G.; Ng, A.; Liu, B.; Yu, P.; Zhou, Z.-H.; Steinbach, M.; Hand, D.; Steinberg, D., 2008, Top 10 algorithms in data mining, In: Knowledge and Information Systems, Nr. 1, 14. Jg., S. 1-37.
- Yeasin, F.; Grenn, M.; Roberts, B., 2020, A Bayesian Networks Approach to Estimate Engineering Change Propagation Risk and Duration, In: IEEE Transactions on Engineering Management, Nr. 3, 67. Jg., S. 869-884.

- Zanner, S.*, 2002, Management inkrementeller Dienstleistungsinnovation, Gestaltungsempfehlungen für Financial E-Services, Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden.
- Zelewski, S.*, Grundlagen, 2008, In: Corsten, H.; Reiß, M. (Hrsg.) Betriebswirtschaftslehre, Band 1, 4. Auflage; München, Wien, S. 1-97.
- Zwicky, F.*, 1989, Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild, Mit Diagrammen, Baeschlin, Glarus.

Anhang

A.1 Suchwortdiagramm

Suchteilbegriff 1 (Synonyme)	Suchteilbegriff 2 (Synonyme)	Suchteilbegriff 1 (Synonyme)	Suchteilbegriff 2 (Synonyme)
Beschreibung	Technische Änderungsanfragen	Description	Engineering Change
Dimensionen	Technische Änderung	Dimensions	Technical Change
Eigenschaften	Produktänderung	Properties	Product Change
Charakteristika	Designänderung	Characteristics	Design Change
Attribute	Änderungsauftrag	Attributes	Change Request
Merkmale	Änderungsanforderung	Specifications	Change Order
Spezifikationen	Änderungsmanagement*	Elements	Engineering Change Management*
Elemente			
Arten			
Typen			

*) ohne Kombination mit Suchteilbegriff 1

13	Produktserie Software Komponente Release Änderung Gesetze & Zertifizierung Integral Soll-Vorgaben verändert	Vorgehensweise Baugruppe Release Änderung Produktivität Teilweise Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben	11	10	9	8	7
	Produktserie	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserie	Produktserie	Produktserie
	Software	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation
	Komponente	Prozess	Prozess	Baugruppe	Baugruppe	Komponente	Komponente
	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung
	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Sicherheit	Sicherheit	Kosten	Kosten
	Integral	Integral	Integral	Modular	Modular	Modular	Modular
	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase
	Regional	International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend
	Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Modul	Dokument	Komponente
	3	2	2	1	4	5	5
	13.300 €	23.100 €	16.500 €	18.700 €	19.200 €	3.800 €	12.900 €

20	19	18	17	16	15	14
Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Einzelposition	Produktportfolio	Produktportfolio
Informationen	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Funktionsweise	Software
Baugruppe	Baugruppe	Prozess	Betriebsmittel	Produkt	Produkt	Prozess
Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung
Technik	Kosten	Gesetze & Zertifizierung	Kosten	Sicherheit	Kosten	Kosten
Integral	Integral	Modular	Integral	Modular	Teilweise Integral	Integral
Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet
Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung
Prototypenphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase
Regional	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Komponente	Produkt	Komponente	Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel	Modul
3	1	4	2	1	2	2
10.300 €	27.600 €	7.800 €	11.800 €	18.600 €	54.200 €	33.900 €

27	Einzelposition	26	25	24	23	22	21
Funktionsweise	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio
Betriebsmittel	Vorgehensweise	Software	Informationen	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Baugruppe	Komponente	Dokument	Produkt	Komponente	Komponente	Betriebsmittel
Kosten	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Teilweise Integral	Produktivität	Kosten	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Technik	Kosten
Ist-Zustand fehlerhaft	Integral	Modular	Modular	Integral	Integral	Modular	Integral
Kann-Änderung	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
Änderungfortplanung nicht erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug der Geschäftsleitung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Serienproduktion	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsleitung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Stakeholder	Einbezug der Geschäftsleitung
Regional	Nutzungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion
Zeitraum eines Auftrags	International	Regional	Regional	International	International	International	Regional
Betriebsmittel	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
5	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Produkt	Baugruppe	Baugruppe	Betriebsmittel
17.600 €	5	5	5	1	5	5	2
		16.800 €	10.400 €	14.200 €	27.600 €		8.900 €

	33	32	31	30	29	28
34	33	32	31	30	29	28
Produktcharge	Einzelposition	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserte	Produktportfolio	Produktcharge
Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Software	Funktionsweise	Informationen	Software	Physikalische Spezifikation
Produkt	Betriebsmittel	Prozess	Prozess	Dokument	Produkt	Produkt
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung
Produktivität	Kosten	Technik	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Produktivität
Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Modular	Modular	Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet
Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung
Nutzungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase
Regional	Regional	Regional	International	International	Regional	Regional
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Komponente	Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel	Dokument	Produkt	Prozess
5	2	4	2	4	1	5
53.100 €	12.300 €	12.500 €	1.700 €	6.800 €	14.700 €	27.200 €

48	Produktportfolio	47	46	45	44	43	42
Vorgehensweise	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Einzelposition	Produktserie	Produktcharge
Prozess	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Informationen	Informationen	Informationen
Release Änderung	Baugruppe	Betriebsmittel	Produkt	Produkt	Prozess	Dokument	Dokument
Produktivität	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung
Modular	Sicherheit	Kosten	Sicherheit	Sicherheit	Produktivität	Technik	Gesetze & Zertifizierung
Ist-Zustand fehlerhaft	Modular	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Modular
Kann-Änderung	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Teilweise Integral	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert
Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet
Entwicklungsphase	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
Regional	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase
Sofort und rückwirkend	International	Regional	International	International	Regional	International	International
Prozess	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
2	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Produkt	Produkt	Komponente	Dokument	Dokument
1.300 €	3	2	1	1	4	4	1
	15.600 €	6.100 €	15.200 €	15.200 €	10.800 €	8.800 €	10.500 €

55	Produktcharge Vorgehensweise Prozess Wichtige kurzfristige Änderung Gesetze & Zertifizierung Modular Soll-Vorgaben verändert	Produktserie Informationen Dokument Release Änderung Gesetze & Zertifizierung Modular Soll-Vorgaben verändert	54	53	52	51	50	49
			Produktportfolio Funktionsweise Baugruppe Release Änderung Produktivität Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes	Produktportfolio Informationen Baugruppe Wichtige kurzfristige Änderung Gesetze & Zertifizierung Modular Soll-Vorgaben verändert	Produktportfolio Funktionsweise Baugruppe Ad-Hoc Technik Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft	Produktportfolio Funktionsweise Komponente Wichtige kurzfristige Änderung Kosten Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes	Produktserie Vorgehensweise Prozess Ad-Hoc Kosten Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben	
			Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- Produkt 3 16.300 €	Muss-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug externer Stakeholder Serieneproduktion Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Komponente 3 10.900 €	Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Serieneproduktion Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Produkt 2 5.900 €	Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet Forschung & Entwicklung Prototypenphase International Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- Komponente 5 12.900 €	Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Nutzungsphase Regional Sofort und rückwirkend Prozess 4 20.300 €	

62	Produktcharge	61	60	59	58	57	56
Physikalische Spezifikation	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Informationen	Produktportfolio	Produktserie	Produktportfolio
Baugruppe	Informationen	Informationen	Informationen	Dokument	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Funktionsweise
Ad-Hoc	Dokument	Dokument	Dokument	Ad-Hoc	Baugruppe	Produkt	Prozess
Kosten	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Kundenanforderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc
Modular	Technik	Sicherheit	Sicherheit	Modular	Technik	Technik	Sicherheit
Ist-Zustand fehlerhaft	Modular	Modular	Modular	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Integral	Integral	Modular
Kann-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Kann-Änderung	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft
Änderungfortpflanzung erwartet	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Einbezug der Geschäftsführung	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet
Nutzungsphase	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder
International	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase
Sofort und rückwirkend	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	International
Modul	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands
2	Dokument	Dokument	Dokument	Dokument	Modul	Dokument	Betriebsmittel
17.300 €	2	3	2	2	5	2	4
	3.600 €	3.600 €	2.600 €	2.600 €	6.200 €	6.600 €	3.200 €

69		68		67		66		65		64		63	
Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Produktportfolio	Produktcharge	Einzelposition	Produktserie	Einzelposition	Produktserie	Einzelposition	Produktserie	Produktserie
Software	Informationen	Software	Software	Software	Physikalische Spezifikation	Software	Physikalische Spezifikation	Software	Software	Software	Funktionsweise	Software	Software
Baugruppe	Baugruppe	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Komponente	Komponente	Produkt	Prozess	Produkt	Produkt
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Produktivität	Produktivität	Produktivität	Technik	Produktivität	Technik	Produktivität	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung
Integral	Modular	Integral	Integral	Integral	Teilweise Integral	Modular	Teilweise Integral	Modular	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral
Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert
Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Prozess	Betriebsmittel	Prozess	Prozess	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel
3	2	2	2	2	2	5	2	5	5	5	5	1	1
13.100 €	28.000 €	2.500 €	2.500 €	2.500 €	8.900 €	17.500 €	8.900 €	17.500 €	17.500 €	15.000 €	15.000 €	28.200 €	28.200 €

76	Produktportfolio	Software	74	73	72	71	70
	Komponente	Baugruppe	Produktcharge	Produktserie	Funktionsweise	Einzelposition	Produktserie
	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Wichtige kurzfristige Änderung	Informationen	Informationen
	Technik	Sicherheit	Prozess	Baugruppe	Prozess	Dokument	Prozess
	Integral	Integral	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung
	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Kosten
	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Integral	Integral	Integral	Modular	Modular
	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes
	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
	Nutzungsphase	Serienproduktion	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet
	Regional	Entwicklungsphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Entwicklungsphase	weitere Abteilungen	Nutzungsphase	Serienproduktion	Prototypenphase	Nutzungsphase
	Dokument	Regional	Entwicklungsphase	International	International	Regional	Regional
	5	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags
	4.900 €	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Dokument	Komponente
		4	5	3	5	5	2
		28.700 €	14.400 €	25.500 €	7.600 €	4.100 €	13.400 €

83	Einzelposition Funktionsweise Prozess Release Änderung Gesetze & Zertifizierung Modular Soll-Vorgaben verändert	Produktportfolio Vorgehensweise Prozess Wichtige kurzfristige Änderung Sicherheit Integral Optimierung des Ist-Zustandes	81	80	79	78	77
		Produktserie Vorgehensweise Betriebsmittel Release Änderung Produktivität Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Serienproduktion Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Komponente	Vorgehensweise Dokument Ad-Hoc Kundenanforderung Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Serienproduktion Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Einzelposition Vorgehensweise Dokument Ad-Hoc Kundenanforderung Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Informationen Dokument Ad-Hoc Technik Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Serienproduktion Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktcharge Software Betriebsmittel Ad-Hoc Produktivität Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Einzelposition Software Komponente Ad-Hoc Kundenanforderung Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
	12.900 €	8.300 €	11.200 €	4.200 €	2.900 €	16.700 €	
	3	2	2	5	2	5	
	1	2	2	5	2	5	
	9.300 €	8.300 €	11.200 €	4.200 €	2.900 €	16.700 €	

90	Produktserie	89	88	87	86	85	84
Vorgehensweise	Produktcharge	Produktportfolio	Produktcharge	Software	Produktcharge	Produktcharge	Produktserie
Prozess	Vorgehensweise	Software	Software	Produkt	Informationen	Funktionsweise	Funktionsweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Komponente	Prozess	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Dokument	Komponente	Komponente
Produktivität	Ad-Hoc	Sicherheit	Sicherheit	Produktivität	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc
Integral	Kosten	Integral	Integral	Integral	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Sicherheit
Ist-Zustand fehlerhaft	Teilweise	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Modular	Modular	Modular
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Prototypenphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	International	Regional	Regional	International
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags
Komponente	Komponente	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Prozess	Dokument	Betriebsmittel	Komponente
5	5	4	4	4	2	5	3
4.100 €	43.300 €	27.200 €	27.200 €	13.900 €	5.000 €	37.800 €	13.100 €

97	Produktcharge	Software	Produkt	Ad-Hoc	Kosten	Modular	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Kann-Änderung	Änderungfortplanung erwartet	Einbezug externer Stakeholder	Entwicklungsphase	Regional	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Software	1	13.200 €
96	Produktportfolio	Software	Produkt	Wichtige kurzfristige Änderung	Technik	Integral	Ist-Zustand fehlerhaft	Kann-Änderung	Änderungfortplanung erwartet	Einbezug der Geschäftsführung	Serienproduktion	International	Sofort und rückwirkend	Modul	5	30.100 €
95	Produktcharge	Funktionsweise	Prozess	Wichtige kurzfristige Änderung	Technik	Modular	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Kann-Änderung	Änderungfortplanung erwartet	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Entwicklungsphase	Regional	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Betriebsmittel	2	5.500 €
94	Produktcharge	Vorgehensweise	Betriebsmittel	Release Änderung	Produktivität	Integral	Ist-Zustand fehlerhaft	Kann-Änderung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Forschung & Entwicklung	Prototypenphase	Regional	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Betriebsmittel	2	4.600 €
93	Produktcharge	Vorgehensweise	Baugruppe	Wichtige kurzfristige Änderung	Kosten	Teilweise Integral	Optimierung des Ist-Zustandes	Kann-Änderung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Forschung & Entwicklung	Nutzungsphase	International	Sofort und rückwirkend	Produkt	5	25.500 €
92	Produktserie	Physikalische Spezifikation	Komponente	Ad-Hoc	Produktivität	Integral	Soll-Vorgaben verändert	Kann-Änderung	Änderungfortplanung erwartet	Forschung & Entwicklung	Prototypenphase	International	Zeitraum eines Auftrags	Modul	5	13.600 €
91	Produktserie	Funktionsweise	Betriebsmittel	Wichtige kurzfristige Änderung	Technik	Integral	Soll-Vorgaben verändert	Kann-Änderung	Änderungfortplanung nicht erwartet	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Prototypenphase	Regional	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Betriebsmittel	2	12.900 €

	103	102	101	100	99	98
104	103	102	101	100	99	98
Einzelposition	Produktcharge	Produktportfolio	Einzelposition	Produktserte	Produktcharge	Produktserte
Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Software	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Informationen
Baugruppe	Betriebsmittel	Baugruppe	Komponente	Betriebsmittel	Komponente	Dokument
Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release-Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release-Änderung
Technik	Sicherheit	Produktivität	Technik	Kosten	Sicherheit	Kundenanforderung
Modular	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Modular
Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung
Nutzungsphase	Serienproduktion	Prototypenphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion
Regional	Regional	International	Regional	Regional	Regional	Regional
Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Modul	Betriebsmittel	Baugruppe	Komponente	Betriebsmittel	Dokument	Dokument
5	2	5	5	2	5	2
31.200 €	12.900 €	17.600 €	14.500 €	9.200 €	17.200 €	9.100 €

111	Produktcharge	110	109	108	107	106	105
Software	Produktserie	Produktportfolio	Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio	Einzelposition	Produktserie
Komponente	Software	Funktionsweise	Informationen	Software	Software	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation
Ad-Hoc	Produkt	Produkt	Baugruppe	Prozess	Prozess	Prozess	Betriebsmittel
Produktivität	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Integral	Kosten	Technik	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Kosten	Produktivität
Integral	Integral	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Teilweise Integral
Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung
Prototypenphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Entwicklungsphase
International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Baugruppe	Betriebsmittel	Produkt	Baugruppe	Prozess	Prozess	Komponente	Betriebsmittel
5	2	5	5	4	4	5	2
13.200 €	12.900 €	26.300 €	24.200 €	13.400 €	13.400 €	6.100 €	13.100 €

118	117	116	115	114	113	112
Produktserie	Einzelposition	Produktserie	Produktcharge	Einzelposition	Produktserie	Einzelposition
Software	Vorgehensweise	Informationen	Funktionsweise	Informationen	Software	Physikalische Spezifikation
Prozess	Produkt	Dokument	Dokument	Prozess	Produkt	Komponente
Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc
Kundenanforderung	Produktivität	Sicherheit	Sicherheit	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Technik
Integral	Modular	Modular	Modular	Modular	Modular	Modular
Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet
Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Prototypenphase
International	Regional	Regional	International	Regional	International	Regional
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags
Modul	Komponente	Dokument	Dokument	Komponente	Komponente	Dokument
2	5	4	4	4	1	5
9.500 €	27.600 €	6.400 €	38.200 €	7.100 €	19.800 €	7.200 €

125	Produktportfolio	123	122	121	120	119
Software	Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserie
Baugruppe	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Funktionsweise	Funktionsweise	Vorgehensweise	Funktionsweise
Ad-Hoc	Baugruppe	Produkt	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument
Gesetze & Zertifizierung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release-Änderung
Teilweise Integral	Technik	Technik	Technik	Kosten	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Modular	Integral	Integral	Teilweise Integral	Integral	Modular
Muss-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert
Änderungfortplanung erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Serienproduktion	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Nutzungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	International
Zeitraum eines Auftrags	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-			
Komponente	Komponente	Komponente	Modul	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument
3	5	1	2	2	2	2
20.700 €	24.000 €	4.900 €	9.300 €	5.600 €	7.200 €	

132	Einzelposition	131	130	129	128	127	126
	Funktionsweise	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktcharge	Produktserie	Produktserie	Produktcharge
	Produkt	Informationen	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Informationen	Funktionsweise
	Wichtige kurzfristige Änderung	Prozess	Produkt	Komponente	Betriebsmittel	Dokument	Komponente
	Gesetze & Zertifizierung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
	Modular	Produktivität	Sicherheit	Gesetze & Zertifizierung	Sicherheit	Gesetze & Zertifizierung	Kosten
	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Integral	Teilweise Integral	Modular	Integral	Modular	Teilweise Integral
	Muss-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft
	Änderungserwartung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung
	Nutzungsphase	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder
	Regional	Serienproduktion	Nutzungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase
	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Regional	International	Regional	Regional	Regional	Regional
	punkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands
	Produkt	Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Betriebsmittel
	1	2	1	4	1	1	5
	26.400 €	15.300 €	32.400 €	13.500 €	1.900 €	8.000 €	15.300 €

146	145	144	143	142	141	140
Einzelposition	Produktserie	Produktcharge	Produktportfolio	Einzelposition	Einzelposition	Produktportfolio
Software	Informationen	Funktionsweise	Software	Funktionsweise	Software	Physikalische Spezifikation
Komponente	Dokument	Komponente	Baugruppe	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel
Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc
Kundenanforderung	Sicherheit	Produktivität	Kundenanforderung	Kosten	Sicherheit	Sicherheit
Integral	Modular	Integral	Integral	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral
Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
Serienproduktion	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Entwicklungsphase
Regional	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Komponente	Dokument	Prozess	Betriebsmittel	Modul	Betriebsmittel	Betriebsmittel
5	3	5	2	5	2	2
43.400 €	11.500 €	9.500 €	27.300 €	27.100 €	8.600 €	14.400 €

153	Produktcharge	Produktcharge	151	149	148	147
Funktionsweise	Funktionsweise	Funktionsweise	Software	Physikalische Spezifikation	Produktserie	Produktserie
Prozess	Komponente	Betriebsmittel	Baugruppe	Produkt	Informationen	Informationen
Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung	Dokument	Dokument
Produktivität	Produktivität	Technik	Kundenanforderung	Kosten	Release Änderung	Release Änderung
Teilweise Integral	Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Sicherheit	Sicherheit
Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Modular	Modular
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert
Änderungfortplanung nicht erwartet	Muss-Änderung	Muss-Änderung				
Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
International	Regional	Regional	Regional	Regional	Serienproduktion	Entwicklungsphase
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Regional	Regional
Prozess	Prozess	Betriebsmittel	Komponente	Produkt	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
4	5	2	3	1	Dokument	Dokument
3.000 €	19.500 €	10.600 €	10.700 €	24.300 €	3	3
						2.400 €

160	Produktserie	159	158	157	156	155	154
Informationen	Produktserie	Informationen	Einzelposition	Produktcharge	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition
Dokument	Informationen	Dokument	Vorgehensweise	Software	Vorgehensweise	Informationen	Software
Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Komponente	Baugruppe	Prozess	Dokument	Baugruppe
Kosten	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung
Modular	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung
Ist-Zustand fehlerhaft	Modular	Modular	Integral	Integral	Modular	Modular	Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung
Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Serienproduktion
International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Dokument	Dokument	Betriebsmittel	Modul	Modul	Prozess	Dokument	Komponente
2	2	5	5	5	4	5	3
5.900 €	3.200 €	12.700 €	26.000 €	3.100 €	4.600 €	6.600 €	

167	Einzelposition Vorgehensweise Betriebsmittel Ad-Hoc Produktivität Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft	Produktportfolio Vorgehensweise Prozess Ad-Hoc Kundenanforderung Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes	165	164	163	162	161
		Produktportfolio Funktionsweise Betriebsmittel Release Änderung Kosten Integral Optimierung des Ist-Zustandes	Produktserie Software Baugruppe Ad-Hoc Produktivität Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Einzelposition Vorgehensweise Komponente Release Änderung Sicherheit Integral Optimierung des Ist-Zustandes	Einzelposition Informationen Produkt Wichtige kurzfristige Änderung Kundenanforderung Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Produktserie Software Baugruppe Release Änderung Kundenanforderung Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft	
		Produktportfolio Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Nutzungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktportfolio Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug externer Stakeholder Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktportfolio Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug externer Stakeholder Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktportfolio Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Nutzungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktportfolio Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	
		Betriebsmittel 2 18.000 €	Betriebsmittel 2 15.900 €	Prozess 3 17.100 €	Produkt 5 12.000 €	Produkt 2 12.500 €	

174	173	172	171	170	169	168
Einzelposition	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserie	Einzelposition	Einzelposition
Software	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Software	Software	Vorgehensweise
Komponente	Produkt	Produkt	Baugruppe	Produkt	Betriebsmittel	Prozess
Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung
Technik	Technik	Kosten	Produktivität	Sicherheit	Produktivität	Technik
Integral	Teilweise Integral	Modular	Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral
Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Nutzungsphase
Regional	Regional	Regional	International	Regional	Regional	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend
Betriebsmittel	Modul	Produkt	Produkt	Modul	Betriebsmittel	Produkt
5	2	1	5	1	1	5
42.700 €	32.000 €	29.300 €	28.700 €	14.800 €	16.100 €	22.500 €

181	Produktserie Software Komponente Release Änderung Sicherheit Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Serienproduktion International Sofort und rückwirkend Betriebsmittel 2 35.100 €	180	Produktcharge Physikalische Spezifikation Baugruppe Ad-Hoc Sicherheit Integral Optimierung des Ist-Zustandes Muss-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug der Geschäftsführung Serienproduktion International Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	179	Produktserie Software Betriebsmittel Ad-Hoc Produktivität Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft	178	Einzelposition Physikalische Spezifikation Betriebsmittel Release Änderung Technik Teilweise Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Prototypenphase Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Betriebsmittel 2 1.300 €	177	Produktserie Informationen Dokument Ad-Hoc Kosten Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Nutzungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	176	Einzelposition Funktionsweise Komponente Wichtige kurzfristige Änderung Kosten Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug externer Stakeholder Prototypenphase Regional Sofort und rückwirkend Komponente 5 13.600 €	175	Produktcharge Physikalische Spezifikation Produkt Wichtige kurzfristige Änderung Sicherheit Integral Optimierung des Ist-Zustandes Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Serienproduktion Regional Sofort und rückwirkend Dokument 1 15.700 €
-----	--	-----	---	-----	---	-----	--	-----	---	-----	---	-----	---

188	Produktcharge	187	186	185	184	183	182
Software	Vorgehensweise	Produktcharge	Physikalische Spezifikation	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio
Prozess	Prozess	Baugruppe	Komponente	Komponente	Produkt	Komponente	Prozess
Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung
Technik	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Sicherheit	Sicherheit	Kosten	Kosten	Gesetze & Zertifizierung
Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral	Modular	Teilweise Integral	Integral
Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet				
Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder
Nutzungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Serienproduktion	Prototypenphase	Nutzungsphase
International	International	Regional	International	International	International	Regional	International
Zeitraum eines Auftrags	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Produkt	Betriebsmittel	Produkt	Komponente	Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Modul
1	4	3	4	4	1	2	4
18.400 €	34.600 €	22.500 €	26.400 €	26.400 €	32.300 €	14.200 €	28.300 €

195	Produktserie	194	193	192	191	190	189
Funktionsweise	Produktserie	Produktserie	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Produktportfolio	Produktserie
Baugruppe	Software	Informationen	Funktionsweise	Funktionsweise	Informationen	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation
Wichtige kurzfristige Änderung	Baugruppe	Dokument	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Betriebsmittel	Baugruppe
Produktivität	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung
Modular	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Kosten	Kosten	Technik	Kosten	Kosten
Optimierung des Ist-Zustandes	Teilweise Integral	Modular	Integral	Integral	Modular	Integral	Teilweise Integral
Kann-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft
Änderungserwartung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug externer Stakeholder	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung
Nutzungsphase	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder
International	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Nutzungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase
Sofort und rückwirkend	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	International
Komponente	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
5	Produkt	Dokument	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Betriebsmittel	Betriebsmittel
21.100 €	5	2	1	2	2	3	2
	14.500 €	8.600 €	33.100 €	7.500 €	6.500 €	22.600 €	

209	Einzelposition Funktionsweise Betriebsmittel Ad-Hoc Technik Integral Soll-Vorgaben verändert Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug der Geschäftsführung Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktportfolio Physikalische Spezifikation Komponente Wichtige kurzfristige Änderung Sicherheit Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Entwicklungsphase International Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Einzelposition Physikalische Spezifikation Komponente Release Änderung Kundenanforderung Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Serienproduktion Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Komponente Modul Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	206	Einzelposition Vorgehensweise Komponente Wichtige kurzfristige Änderung Gesetze & Zertifizierung Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Serienproduktion Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	207	Einzelposition Physikalische Spezifikation Komponente Release Änderung Kundenanforderung Teilweise Integral Ist-Zustand fehlerhaft Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Serienproduktion Regional Ab dem Verbrauch des Restbestands Komponente Modul Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	208	Produktportfolio Physikalische Spezifikation Komponente Wichtige kurzfristige Änderung Sicherheit Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug der Geschäftsführung Entwicklungsphase International Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	209	Einzelposition Funktionsweise Betriebsmittel Ad-Hoc Technik Integral Soll-Vorgaben verändert Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug der Geschäftsführung Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	210	Einzelposition Funktionsweise Betriebsmittel Ad-Hoc Technik Integral Soll-Vorgaben verändert Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Einbezug der Geschäftsführung Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	205	Produktportfolio Software Komponente Release Änderung Gesetze & Zertifizierung Teilweise Integral Soll-Vorgaben falsch beschrieben Muss-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Nutzungsphase International Ab dem Verbrauch des Restbestands Produkt 3 32.700 €	204	Produktchange Informationen Dokument Ad-Hoc Kosten Modular Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet Forschung & Entwicklung Prototypenphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	203	Produktportfolio Vorgehensweise Baugruppe Wichtige kurzfristige Änderung Kundenanforderung Modular Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Nutzungsphase Regional Zeitraum eines Auftrags Produkt 5 14.200 €
-----	---	--	--	-----	--	-----	--	-----	--	-----	---	-----	---	-----	---	-----	---	-----	--

216	215	214	213	212	211	210
Produktcharge	Produktportfolio	Einzelposition	Produktcharge	Produktserte	Einzelposition	Produktserte
Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Funktionsweise	Informationen	Physikalische Spezifikation
Baugruppe	Prozess	Komponente	Prozess	Betriebsmittel	Produkt	Produkt
Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc
Kundenanforderung	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung
Modular	Modular	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet
Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Serienproduktion	Nutzungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion
International	International	Regional	International	Regional	Regional	International
Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend
Produkt	Komponente	Komponente	Modul	Betriebsmittel	Produkt	Prozess
5	2	3	5	2	1	4
21.200 €	23.500 €	44.400 €	6.600 €	9.500 €	17.000 €	29.900 €

223	Einzelposition	222	221	220	219	218	217
Software	Produktcharge	Produktserie	Produktcharge	Einzelposition	Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio
Produkt	Software	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Informationen	Software	Funktionsweise	Funktionsweise
Release Änderung	Baugruppe	Betriebsmittel	Baugruppe	Prozess	Betriebsmittel	Prozess	Prozess
Technik	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung
Modular	Produktivität	Produktivität	Technik	Kundenanforderung	Produktivität	Sicherheit	Sicherheit
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Teilweise Integral	Integral	Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral
Kann-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft
Änderungfortplanung erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Forschung & Entwicklung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Nutzungsphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung
Regional	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Serienproduktion
Ab dem Verbrauch des Restbestands	International	Regional	International	Regional	Regional	Regional	Regional
Dokument	Sofort und rückwirkend	Sofort a b dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
2	Produkt	Betriebsmittel	Produkt	Produkt	Betriebsmittel	Prozess	Prozess
7.700 €	1	2	5	2	1	4	4
	16.300 €	11.900 €	9.500 €	27.200 €	9.600 €	9.600 €	9.600 €

230	Produktserie	229	Produktcharge	228	227	226	225	224
Informationen	Software	Produktcharge	Software	Produktcharge	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Einzelposition	Produktcharge
Dokument	Prozess	Produkt	Produkt	Baugruppe	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Funktionsweise	Informationen
Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Dokument
Kundenanforderung	Produktivität	Kosten	Kosten	Produktivität	Produktivität	Technik	Produktivität	Ad-Hoc
Modular	Teilweise Integral	Modular	Modular	Integral	Integral	Integral	Modular	Gesetze & Zertifizierung
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Modular
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung erwartet	Änderungsförderung erwartet	Änderungsförderung erwartet	Änderungsförderung erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Serienproduktion	Serienproduktion	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	International
Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbruch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbruch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Dokument	Produkt	Prozess	Prozess	Baugruppe	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Komponente	Dokument
5	1	4	4	5	2	2	5	4
2.300 €	26.200 €	23.800 €	23.800 €	14.100 €	22.400 €	22.400 €	14.900 €	9.400 €

244	Produktcharge Vorgehensweise	243	Produktcharge Physikalische Spezifikation	242	Produktserie	241	Produktcharge	240	Produktportfolio	239	Produktportfolio	238	Produktcharge
Prozess	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Funktionsweise	Funktionsweise	Komponente	Funktionsweise	Informationen	Funktionsweise	Komponente	Informationen	Dokument	Informationen
Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Gesetze & Zertifizierung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc				
Technik	Sicherheit	Sicherheit	Sicherheit	Kosten	Kosten	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Sicherheit	Sicherheit
Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Modular	Modular
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet	Änderungsfortplanung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug der Geschäftsleitung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung
Serienproduktion	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	International	International	Regional	International	International	International	Regional	Regional
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Komponente	Komponente	Komponente	Produkt	Produkt	Produkt	Dokument	Dokument
4	3	3	2	2	1	1	1	2	3	3	3	4	4
13.600 €	5.800 €	5.800 €	3.800 €	3.800 €	46.600 €	46.600 €	46.600 €	18.300 €	48.000 €	48.000 €	48.000 €	5.300 €	5.300 €

251	Produktserie	250	249	248	247	246	245
Physikalische Spezifikation	Produktportfolio	Produktcharge	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktcharge	Produktserie
Komponente	Software	Funktionsweise	Vorgehensweise	Komponente	Software	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Prozess	Prozess	Komponente	Wichtige kurzfristige Änderung	Betriebsmittel	Baugruppe	Betriebsmittel
Technik	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung
Teilweise Integral	Produktivität	Kundenanforderung	Integral	Integral	Produktivität	Kosten	Produktivität
Soll-Vorgaben verändert	Modular	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral
Kann-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert
Änderungfortplanung nicht erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug der Geschäftsführung	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Nutzungsphase	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
Regional	Serienproduktion	Serienproduktion	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Serienproduktion	Nutzungsphase	Entwicklungsphase
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsprozesses	Regional	International	International	International	Regional	Regional	Regional
5	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsprozesses	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsprozesses
2	Betriebsmittel	Komponente	Prozess	Prozess	Betriebsmittel	Modul	Betriebsmittel
50.900 €	2	4	5	5	2	2	2
	16.000 €	14.300 €	35.200 €	35.200 €	13.200 €	14.900 €	3.500 €

258	Produktportfolio	257	256	255	254	253	252
Vorgehensweise	Einzelposition	Produktportfolio	Software	Informationen	Produktserte	Produktserte	Produktcharge
Prozess	Vorgehensweise	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Vorgehensweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Technik	Sicherheit	Produktivität	Produktivität	Sicherheit	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Technik
Teilweise Integral	Modular	Integral	Integral	Modular	Teilweise Integral	Integral	Modular
Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet
Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung
Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	International	Regional
Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Produkt	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Dokument	Betriebsmittel	Komponente	Komponente
5	3	2	2	3	3	5	5
26.800 €	14.000 €	8.300 €	8.300 €	5.200 €	3.700 €	49.500 €	8.800 €

265	Produktserie	264	263	262	261	260	259
Funktionsweise	Produktserie	Produktcharge	Einzelposition	Produktserie	Produktcharge	Funktionsweise	Einzelposition
Prozess	Informationen	Informationen	Funktionsweise	Software	Funktionsweise	Funktionsweise	Funktionsweise
Ad-Hoc	Dokument	Dokument	Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Baugruppe	Baugruppe
Sicherheit	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release-Änderung	Ad-Hoc	Release-Änderung	Release-Änderung
Integral	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Sicherheit	Produktivität	Sicherheit	Sicherheit
Optimierung des Ist-Zustandes	Modular	Modular	Integral	Modular	Integral	Integral	Integral
Muss-Änderung	Soll-Vorgaben verfährt	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verfährt	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft
Änderungfortplanung nicht erwartet	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Forschung & Entwicklung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
Serienproduktion	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Regional	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase
Sofort und rückwirkend	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Produkt	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
4	Dokument	Dokument	Dokument	Produkt	Betriebsmittel	Komponente	Komponente
7.000 €	1	2	5	1	2	3	3
	10.400 €	10.000 €	11.400 €	36.200 €	7.100 €	14.200 €	14.200 €

272	Produktcharge	271	270	269	268	267	266
Produktserie	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserie	Produktserie	Produktserie	Einzelposition
Informationen	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Informationen	Informationen	Informationen	Software
Prozess	Komponente	Prozess	Prozess	Prozess	Produkt	Dokument	Baugruppe
Ad-Hoc	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Sicherheit	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Kundenanforderung	Kosten	Produktivität
Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Modular	Teilweise Integral
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft
Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet				
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung
Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase
International	Regional	International	Regional	Regional	Regional	International	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags
Betriebsmittel	Baugruppe	Komponente	Komponente	Komponente	Komponente	Dokument	Komponente
4	5	3	2	5	2	5	5
12.400 €	14.200 €	2.600 €	8.900 €	18.500 €	8.900 €	8.900 €	10.800 €

279	Produktserie		278	Produktserie		277	Produktchange		276	Produktserie		275	Produktchange		274	Produktserie		273
Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Prozess	Release Änderung	Vorgehensweise	Baugruppe	Ad-Hoc	Software	Betriebsmittel	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Informationen	Dokument	Informationen	Wichtige kurzfristige Änderung	Betriebsmittel	Produktserie
Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Technik	Kosten	Technik	Betriebsmittel	Produktserie												
Modular	Modular	Modular	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Modular	Modular	Modular	Teilweise Integral	Produktserie
Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Produktserie								
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Produktserie										
Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung erwartet	Änderung fortplanung erwartet	Änderung fortplanung erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Änderung fortplanung nicht erwartet	Produktserie
Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Produktserie						
Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Produktserie										
Regional	International	International	International	International	International	International	Regional	Produktserie										
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Produktserie										
Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Produktserie						
5	2	2	2	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5	5	2	Produktserie
22.100 €	5.000 €	5.000 €	5.000 €	13.500 €	13.500 €	13.500 €	13.700 €	13.700 €	13.700 €	13.700 €	13.700 €	21.500 €	21.500 €	10.700 €	10.700 €	1.700 €	1.700 €	Produktserie

	285	284	283	282	281	280
Produktportfolio						
Vorgehensweise	Produktcharge	Einzelposition	Einzelposition	Produktcharge	Einzelposition	Einzelposition
Komponente	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Funktionsweise	Vorgehensweise	Funktionsweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Produkt	Komponente	Komponente	Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel
Sicherheit	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung
Integral	Kosten	Kundenanforderung	Sicherheit	Technik	Kosten	Produktivität
Ist-Zustand fehlerhaft	Teilweise Integral	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Integral
Muss-Änderung	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Änderungserwartung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug der Geschäftsführung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung
Prototypenphase	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Regional	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase
Sofort und rückwirkend	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Betriebsmittel	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags
5	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Komponente	Betriebsmittel	Komponente	Betriebsmittel
17.500 €	2	2	5	2	2	2
	27.400 €	5.400 €	15.600 €	9.700 €	13.000 €	19.500 €

307	Produktportfolio	306	305	304	303	302	301
Software	Einzelposition	Produktserie	Einzelposition	Produktportfolio	Produktchange	Produktserie	Produktserie
Komponente	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Informationen	Physikalische Spezifikation	Informationen	Informationen
Ad-Hoc	Komponente	Prozess	Produkt	Prozess	Produkt	Dokument	Dokument
Kundenanforderung	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc
Integral	Technik	Technik	Sicherheit	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Sicherheit	Sicherheit
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Modular	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral	Modular	Modular
Kann-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
Änderungserwartung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Einbezug externer Stakeholder	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung
Prototypenphase	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung
Regional	Serienproduktion	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Regional	Regional	Regional	International	Regional	Regional	Regional
Komponente	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
5	Komponente	Produkt	Produkt	Komponente	Produkt	Dokument	Dokument
16.900 €	5	1	1	4	1	4	4
	24.900 €	28.900 €	60.900 €	37.500 €	9.000 €	5.600 €	5.600 €

314	313	312	311	310	309	308
Einzelposition	Produktserie	Produktportfolio	Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Produktserie
Software	Software	Funktionsweise	Vorgehensweise	Informationen	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise
Betriebsmittel	Prozess	Baugruppe	Betriebsmittel	Prozess	Produkt	Prozess
Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Release Änderung	A.d-Hoc
Technik	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Technik	Sicherheit	Kundenanforderung
Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Modular	Modular	Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Prototypenphase	Serienproduktion	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion
Regional	Regional	International	Regional	Regional	Regional	Regional
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands
Betriebsmittel	Modul	Komponente	Betriebsmittel	Produkt	Produkt	Prozess
2	5	3	2	1	1	4
10.000 €	17.800 €	19.700 €	2.100 €	1.300 €	10.300 €	8.800 €

321	Einzelposition Software Komponente Ad-Hoc	Produktserie Software Komponente Wichtige kurzfristige Änderung	320	Produktserie Physikalische Spezifikation Baugruppe Release Änderung Kosten	319	Produktserie Physikalische Spezifikation Produkt Ad-Hoc Kosten	318	Produktportfolio Vorgehensweise Baugruppe Ad-Hoc Kosten	317	Einzelposition Funktionsweise Produkt Release Änderung Kosten	316	Einzelposition Vorgehensweise Prozess Ad-Hoc Kundenanforderung	315
Produktivität	Modular Kundenanforderung	Teilweise Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Integral	Modular	Modular	Modular	Modular
Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung
Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder
Nutzungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	International	International	International	International	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Produkt	Prozess	Modul	Modul	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Komponente	Komponente	Prozess	Prozess
5	5	2	2	1	1	1	1	3	3	2	2	4	4
16.800 €	13.900 €	11.200 €	11.200 €	43.700 €	43.700 €	43.700 €	43.700 €	9.000 €	9.000 €	22.900 €	22.900 €	1.800 €	1.800 €

328	327	326	325	324	323	322
Produktportfolio	Einzelposition	Produktserte	Einzelposition	Produktcharge	Produktserte	Produktserte
Software	Funktionsweise	Funktionsweise	Vorgehensweise	Informationen	Physikalische Spezifikation	Software
Produkt	Komponente	Komponente	Prozess	Dokument	Komponente	Baugruppe
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung
Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Technik	Technik	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung
Teilweise Integral	Modular	Modular	Integral	Modular	Integral	Teilweise Integral
Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung
Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Serienproduktion	Prototypenphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	International	Regional	International	International	Regional
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
Betriebsmittel	Produkt	Prozess	Komponente	Dokument	Baugruppe	Komponente
5	3	5	5	1	5	3
26.200 €	31.100 €	13.200 €	16.200 €	8.400 €	15.100 €	18.400 €

335	334	333	332	331	330	329
Produktcharge	Einzelposition	Einzelposition	Produktserie	Produktcharge	Produktserie	Einzelposition
Funktionsweise	Software	Physikalische Spezifikation	Software	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Software
Betriebsmittel	Baugruppe	Komponente	Produkt	Prozess	Komponente	Betriebsmittel
Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Release Änderung	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc
Produktivität	Produktivität	Technik	Technik	Sicherheit	Sicherheit	Produktivität
Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Teilweise Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung
Entwicklungsphase	Prototypenphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase
Regional	Regional	Regional	Regional	International	Regional	Regional
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Betriebsmittel	Komponente	Betriebsmittel	Modul	Prozess	Prozess	Betriebsmittel
1	2	2	5	4	4	2
10.500 €	17.700 €	16.200 €	17.400 €	39.600 €	10.900 €	9.700 €

342	Produktportfolio	340	339	338	337	336
Physikalische Spezifikation	Einzelposition	Einzelposition	Produktserie	Produktserie	Produktserie	Produktcharge
Komponente	Informationen	Vorgehensweise	Informationen	Informationen	Physikalische Spezifikation	Software
Release Änderung	Prozess	Prozess	Prozess	Prozess	Komponente	Komponente
Gesetze & Zertifizierung	Ad-Hoc	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Modular	Kundenanforderung	Sicherheit	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Technik	Kundenanforderung
Optimierung des Ist-Zustandes	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral	Integral	Modular	Integral
Muss-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Optimierung des Ist-Zustandes
Änderungfortplanung erwartet	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
Serienproduktion	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
International	Prototypenphase	Nutzungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Regional	Regional	International	International	International	Regional
punkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags
Betriebsmittel	Produkt	Prozess	Komponente	Komponente	Betriebsmittel	Betriebsmittel
1	4	4	4	4	2	5
42.900 €	14.800 €	39.700 €	8.400 €	8.400 €	14.700 €	43.700 €

349	Produktserie Vorgehensweise Prozess Release Änderung Kosten Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Serienproduktion Regional Sofort und rückwirkend Produkt 2 14.600 €	348	Produktserie Informationen Dokument Release Änderung Kundenanforderung Modular Soll-Vorgaben verfährt Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Entwicklungsphase Regional Sofort und rückwirkend Dokument 2 10.800 €	347	Produktcharge Informationen Dokument Ad-Hoc Gesetze & Zertifizierung Modular Soll-Vorgaben falsch beschrieben Muss-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Nutzungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- punkt des Änderungs- Dokument 1 10.600 €	346	Produktcharge Funktionsweise Komponente Ad-Hoc Technik Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung erwartet Einbezug externer Stakeholder Nutzungsphase International Zeitraum eines Auftrags Baugruppe 5 13.300 €	345	Produktportfolio Software Baugruppe Release Änderung Sicherheit Integral Optimierung des Ist-Zustandes Muss-Änderung Änderungfortplanung erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Serienproduktion Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- punkt des Änderungs- Produkt 1 19.300 €	344	Produktserie Physikalische Spezifikation Betriebsmittel Ad-Hoc Sicherheit Teilweise Integral Soll-Vorgaben verfährt Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Entwicklungsphase Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- punkt des Änderungs- Betriebsmittel 2 21.800 €	343	Produktserie Vorgehensweise Produkt Release Änderung Produktivität Teilweise Integral Optimierung des Ist-Zustandes Kann-Änderung Änderungfortplanung nicht erwartet F&E zusammen mit weiteren Abteilungen Serienproduktion Regional Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs- punkt des Änderungs- Prozess 2 34.400 €
-----	--	-----	---	-----	---	-----	--	-----	--	-----	---	-----	---

363	362	361	360	359	358	357
Produktportfolio	Einzelposition	Einzelposition	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktchange	Einzelposition
Software	Software	Software	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Physikalische Spezifikation	Software
Prozess	Komponente	Komponente	Produkt	Betriebsmittel	Produkt	Komponente
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung
Produktivität	Kosten	Produktivität	Technik	Technik	Sicherheit	Sicherheit
Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Teilweise Integral	Integral	Modular
Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder
Entwicklungsphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase
Regional	Regional	Regional	International	Regional	International	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags
Komponente	Komponente	Modul	Produkt	Betriebsmittel	Produkt	Dokument
5	2	5	5	2	1	5
7.300 €	46.400 €	16.100 €	35.600 €	9.300 €	39.600 €	12.300 €

370	Produktportfolio	369	368	367	366	365	364
Funktionsweise	Produktcharge	Produktserie	Einzelposition	Produktcharge	Produktserie	Produktcharge	Produktcharge
Produkt	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Informationen	Vorgehensweise	Vorgehensweise
Wichtige kurzfristige Änderung	Prozess	Prozess	Prozess	Baugruppe	Dokument	Betriebsmittel	Betriebsmittel
Produktivität	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Teilweise Integral	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Technik
Soll-Vorgaben verändert	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral
Kann-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
Änderungfortplanung erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug externer Stakeholder	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
Prototypenphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Regional	Serienproduktion	Nutzungsphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion
Ab dem Verbrauch des Restbestands	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Komponente	Sofort und rückwirkend	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
5	Komponente	Modul	Produkt	Produkt	Dokument	Betriebsmittel	Betriebsmittel
16.200 €	4	5	1	3	1	2	2
	16.500 €	16.100 €	3.400 €	28.400 €	2.700 €	12.100 €	12.100 €

377	Produktserie Vorgehensweise Produkt Release Änderung Sicherheit	376	Produktserie Funktionsweise Baugruppe Ad-Hoc Sicherheit	375	Produktserie Physikalische Spezifikation Baugruppe Wichtige kurzfristige Änderung Produktivität	374	Produktcharge Software Betriebsmittel Wichtige kurzfristige Änderung Kosten	373	Produktserie Informationen Baugruppe Wichtige kurzfristige Änderung Produktivität	372	Produktportfolio Physikalische Spezifikation Komponente Ad-Hoc Produktivität	371	Produktportfolio Vorgehensweise Prozess Wichtige kurzfristige Änderung Kundenanforderung
Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Integral	Integral	Integral	
Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	
Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	
Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	Änderungserwartung	
Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	Stakeholder	
Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	
Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	
Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	Produkt	
1	4	5	2	5	2	5	5	5	5	5	5	5	
34.600 €	56.900 €	15.800 €	24.100 €	20.300 €	24.100 €	20.300 €	20.300 €	20.300 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	3.500 €	

384	Produktserie	383	382	381	380	379	378
Software	Einzelposition	Einzelposition	Vorgehensweise	Produktportfolio	Produktserie	Einzelposition	Produktportfolio
Produkt	Funktionsweise	Funktionsweise	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Physikalische Spezifikation	Funktionsweise	Funktionsweise
Ad-Hoc	Prozess	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Release-Änderung	Betriebsmittel	Betriebsmittel
Kundenanforderung	Kundenanforderung	Produktivität	Produktivität	Produktivität	Produktivität	Release-Änderung	Release-Änderung
Modular	Modular	Integral	Integral	Integral	Integral	Kosten	Kosten
Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Teilweise Integral	Integral
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Soll-Vorgaben falsch beschreiben	Soll-Vorgaben verändert
Änderungfortpflanzung erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Änderungfortpflanzung nicht erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Änderungfortpflanzung nicht erwartet
Serienproduktion	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Serienproduktion
Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel
2	5	2	2	2	1	2	2
30.200 €	43.800 €	7.600 €	1.600 €	21.300 €	2.300 €	8.800 €	8.800 €

398	Produktportfolio	397	Produktcharge	396	Produktportfolio	395	Einzelposition	394	Produktserie	393	Produktcharge	392
Informationen	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Produkt	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Physikalische Spezifikation	Baugruppe	Software	Prozess	Vorgehensweise	Prozess
Produkt	Prozess	Prozess	Produkt	Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Baugruppe	Ad-Hoc	Prozess	Prozess	Prozess	Prozess
Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung
Kundenanforderung	Produktivität	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Kundenanforderung	Sicherheit	Sicherheit	Kosten	Kosten	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung
Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Modular	Integral	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral
Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung
Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet	Änderungsförderung nicht erwartet
Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen
Prototypenphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Nutzungsphase	Nutzungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion
International	International	International	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	International	International	International	International
Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Sofort und rückwirkend	Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags
Produkt	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Komponente	Komponente	Baugruppe	Baugruppe	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Prozess	Prozess	Modul	Modul
1	4	4	1	1	3	3	3	3	4	4	4	4
13.900 €	9.300 €	9.300 €	31.900 €	31.900 €	9.900 €	9.900 €	7.400 €	7.400 €	19.900 €	19.900 €	18.400 €	18.400 €

405	Einzelposition	404	403	402	401	400	399
Physikalische Spezifikation	Produktportfolio	Produktserie	Produktserie	Produktserie	Produktportfolio	Produktserie	Produktportfolio
Baugruppe	Software	Software	Funktionsweise	Baugruppe	Physikalische Spezifikation	Informationen	Software
Release Änderung	Ad-Hoc	Komponente	Produkt	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Dokument	Produkt
Kosten	Produktivität	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Technik	Technik	Sicherheit	Ad-Hoc
Modular	Integral	Sicherheit	Kosten	Integral	Integral	Modular	Technik
Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Forschung & Entwicklung	Einbezug der Geschäftsführung
Serienproduktion	Nutzungsphase	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Nutzungsphase	Prototypenphase
Regional	International	Regional	International	International	International	International	International
Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands
Produkt	Modul	Prozess	Produkt	Produkt	Produkt	Dokument	Produkt
3	3	3	1	1	1	4	1
13.600 €	24.400 €	13.000 €	11.200 €	14.500 €	4.600 €	13.300 €	

412	411	410	409	408	407	406
Einzelposition	Einzelposition	Einzelposition	Produktportfolio	Produktserte	Einzelposition	Produktcharge
Funktionsweise	Informationen	Informationen	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation
Betriebsmittel	Dokument	Baugruppe	Betriebsmittel	Produkt	Betriebsmittel	Komponente
Wichtige kurzfristige Änderung	Release Änderung	Release Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc	Release Änderung	Ad-Hoc
Technik	Kundenanforderung	Gesetze & Zertifizierung	Produktivität	Produktivität	Kosten	Kosten
Modular	Modular	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Integral
Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben verändert	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben verändert
Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet
Einbezug der Geschäftsführung	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder
Serienproduktion	Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Serienproduktion	Serienproduktion	Serienproduktion	Entwicklungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Ab dem Verbrauch des Restbestands	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwirkend
Betriebsmittel	Dokument	Produkt	Betriebsmittel	Prozess	Betriebsmittel	Betriebsmittel
2	2	3	2	4	2	5
51.800 €	7.600 €	19.000 €	11.600 €	37.300 €	10.200 €	18.400 €

419	Einzelposition	418	417	416	415	414	413
Physikalische Spezifikation	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktportfolio	Produktserie	Einzelposition	Produktchange	Produktchange
Komponente	Funktionsweise	Vorgehensweise	Vorgehensweise	Physikalische Spezifikation	Vorgehensweise	Informationen	Funktionsweise
Ad-Hoc	Betriebsmittel	Komponente	Komponente	Produkt	Produkt	Prozess	Prozess
Kundenanforderung	Release Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Wichtige kurzfristige Änderung	Ad-Hoc	Ad-Hoc
Modular	Kosten	Produktivität	Produktivität	Gesetze & Zertifizierung	Gesetze & Zertifizierung	Kundenanforderung	Kundenanforderung
Optimierung des Ist-Zustandes	Integral	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular	Teilweise Integral	Teilweise Integral	Modular
Kann-Änderung	Optimierung des Ist-Zustandes	Soll-Vorgaben verändert	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Soll-Vorgaben falsch beschrieben	Ist-Zustand fehlerhaft	Ist-Zustand fehlerhaft
Änderungfortplanung nicht erwartet	Kann-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Kann-Änderung
Einbezug der Geschäftsführung	Änderungfortplanung nicht erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet	Änderungfortplanung erwartet
Entwicklungsphase	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	F&E zusammen mit weiteren Abteilungen	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug der Geschäftsführung	Forschung & Entwicklung	Forschung & Entwicklung
Regional	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Prototypenphase	Serienproduktion	Entwicklungsphase	Prototypenphase
Sofort und rückwendend	Regional	Regional	Regional	International	Regional	International	Regional
Dokument	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Sofort und rückwendend	Sofort und rückwendend	Sofort und rückwendend	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungs-
5	Betriebsmittel	Modul	Modul	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Prozess	Betriebsmittel
8.000 €	2	5	5	1	1	4	4
	28.300 €	13.300 €	13.600 €	13.600 €	33.900 €	3.800 €	6.400 €

430	429	428	427	426
Produktserie	Einzelposition	Produktserie	Produktserie	Produktserie
Informationen	Funktionsweise	Informationen	Vorgehensweise	Funktionsweise
Betriebsmittel	Betriebsmittel	Betriebsmittel	Prozess	Betriebsmittel
Release-Änderung	Release-Änderung	Release-Änderung	Release-Änderung	Release-Änderung
Sicherheit	Kosten	Kosten	Produktivität	Kosten
Modular	Integral	Teilweise Integral	Modular	Teilweise Integral
Soll-Vorgaben verändert	Optimierung des Ist-Zustandes	Ist-Zustand fehlerhaft	Optimierung des Ist-Zustandes	Optimierung des Ist-Zustandes
Muss-Änderung	Muss-Änderung	Muss-Änderung	Kann-Änderung	Muss-Änderung
Änderungfortplanzung erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet	Änderungfortplanzung nicht erwartet
F&E zusammen mit weiteren Abnehmern	Einbezug externer Stakeholder	Einbezug externer Stakeholder	Forschung & Entwicklung	F&E zusammen mit weiteren Abnehmern
Entwicklungsphase	Entwicklungsphase	Prototypenphase	Nutzungsphase	Entwicklungsphase
Regional	Regional	Regional	Regional	Regional
Zeitraum eines Auftrags	Zeitraum eines Auftrags	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsmodul	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsmodul	Sofort ab dem Zeitpunkt des Änderungsmodul
Komponente	Betriebsmittel	Modul	Betriebsmittel	Prozess
3	2	3	2	2

A.4 Algorithmus zur Ermittlung von Grundtypen

```

gti = ["Betroffenes Objekt",
"Umfang der Aenderung",
"Notwendigkeit der Aenderung",
"Dringlichkeit",
"Zeitliche Gueltigkeit"]

# Berechnung des Jaccard-Koeffizient
def jaccard_coefficient(list1, list2):
s = 0
for i in range(len(list1)):
if list1[i] == list2[i]:
s += 1
union = (len(list1) + len(list2)) - s
j = s / union
return j

# Finde Index mit hoechsten Wert in der Liste
def find_max_index(lst):
max_index = 0
for i in range(1, len(lst)):
if lst[i] > lst[max_index]:
max_index = i
return max_index

# Finden der Aenderungstypen
aenderungstypen_spalte = []
jcc_gt1 = []
jcc_gt2 = []
jcc_gt3 = []
jcc_gt4 = []
jcc_gt5 = []
for row in clean_anderungsdatenbank.iterrows():
jcc = []
for index, grundtyp in clean_grundtypen.iterrows():
j = jaccard_coefficient(row[1].to_list(), clean_grundtypen.loc[index].tolist())
jcc.append(j)
if index == 0:
jcc_gt1.append(j)
if index == 1:
jcc_gt2.append(j)
if index == 2:
jcc_gt3.append(j)
if index == 3:
jcc_gt4.append(j)
if index == 4:
jcc_gt5.append(j)
gt_with_max_jcc = find_max_index(jcc)
print("Index des GT mit hoechste JCC: " + str(gt_with_max_jcc))
aenderungstypen_spalte.append(gt_with_max_jcc)

```

A.5 Algorithmus zum Trainieren des Prädiktionsmodells

```
# Initialisierung und Laden der Bibliotheken
import warnings
import pandas as pd
import numpy as np
import joblib

from sklearn.model_selection import train_test_split, cross_val_score
from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import make_scorer
from sklearn.model_selection import GridSearchCV
from sklearn.compose import ColumnTransformer
from sklearn.pipeline import Pipeline
from sklearn.preprocessing import OneHotEncoder

from grundtypen import set_gt

# magic numbers
prediction_value = ['Gesamtaenderungsaufwand']
prediction_Features = [
'Aenderungstyp',
'Aenderungsvolumen',
'Betroffene Objektspezifikation',
'Grund der Aenderung',
'Architektur',
'Ursache der Aenderung',
'Risiko der Fortpflanzung',
'Betroffene Stakeholder',
'Phase des Lebenszykluses',
'Betroffene Marktausdehnung',
'Umfang der Aenderung']

# Default Parameters
param_default = {"random_state": 42,
                 "n_estimators": 500,
                 "max_features": 'sqrt',
                 "bootstrap": True,
                 "oob_score": True,
                 "min_samples_leaf": 2,
                 "classifier__max_depth": None}

# Parameters for Grid Search
param_grid = [{"classifier__n_estimators": [100, 500, 1000, 2000],
               "classifier__max_depth": [1, 10, 100, 200, 42],
               "classifier__max_features": [1, 2, 3, 4, 'sqrt']}]

# Input File Path
path_aenderungsdB = './data/excel input files/Validierung_v02.xlsx'
path_trained_model = './model/trained_rf_model.pkl'
path_result_gridsearch = './data/result_gcv.xlsx'
path_to_save_new_prediction = './data/prediction_for_new_data.xlsx'
worksheet_name = 0
```

```

def model_training():
# Setzen der Grundtypen / importieren der Datensätze und cleaning
set_gt(path_aenderungsdB, worksheet_name)

def train_test_preprocess_n_split(df):
# Generating df_prediction dataframe to predict
All_Features = df.columns
Not_Prediction_Features = All_Features.drop(prediction_Features + prediction_value)
df_prediction = df.drop(Not_Prediction_Features, axis=1)
# Splitting training data and test data
X = df_prediction.drop(prediction_value, axis=1)
X = X.astype('str')
y = df_prediction[prediction_value]
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=param_default['random_state'])

return X_train, X_test, y_train, y_test

# Defining root mean square error function
# To prevent bias of the sampling, cross validation is a good technique.
def rmse_cv_test(model, X_test, y_test, scorer):
rmse = np.sqrt(-cross_val_score(model, X_test, y_test, scoring=scorer, cv=5))
return rmse

def prediction(df):
# One-hot-encoding
# It is essential process to let computer understand categorical data
# and transfer the formulate to modelling
# df_prediction = pd.get_dummies(df_prediction)
categorical_columns = prediction_Features
categorical_encoder = OneHotEncoder(handle_unknown='ignore')

preprocessing = ColumnTransformer(
[(('cat', categorical_encoder, categorical_columns)])

rf_model = Pipeline([
('preprocess', preprocessing),
('classifier', RandomForestRegressor(random_state=param_default['random_state'],
n_estimators=param_default['n_estimators'],
max_features=param_default['max_features'],
bootstrap=param_default['bootstrap'],
oob_score=param_default['oob_score'],
min_samples_leaf=param_default['min_samples_leaf'],
max_depth=param_default['classifier__max_depth'])))

### PREPROCESSING
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_preprocess_n_split(df)

### MODELING: Target Änderungsaufwand
# Setting random Forest model
rf_model.fit(X_train, y_train.values.ravel())

# Computing variation and prediction power
scorer = make_scorer(mean_squared_error, greater_is_better=False)
rf_cv_rmse = rmse_cv_test(rf_model, X_test, y_test, scorer).mean()

```

```

rf_score = rf_model.score(X_test, y_test.values.ravel())

## Grid Serach CV
gcv_tree = GridSearchCV(estimator=rf_model,
    param_grid=param_grid,
    scoring=scorer,
    refit=rf_score,
    return_train_score=True,
    n_jobs=8)

gcv_tree.fit(X_train, y_train.values.ravel())
# GridSearchCV Ergebnisse speichern
result_gcv = gcv_tree.cv_results_

# Fitting rf model based on grid search best parameters
best_params = gcv_tree.best_params_

rf_model.set_params(classifier__n_estimators=best_params['classifier__n_estimators'],
    classifier__max_features=best_params['classifier__max_features'],
    classifier__max_depth=best_params['classifier__max_depth'])
# Setting random Forest model
rf_model.fit(X_train, y_train.values.ravel())

best_model_rf_cv_rmse = rmse_cv_test(rf_model, X_test, y_test, scorer).mean()
best_model_rf_score = rf_model.score(X_test, y_test)

### POSTPROCESSING (Prediction based on best model)
# Filling required columns into dataframe
y_rfPred = rf_model.predict(pd.concat([X_train, X_test], axis=0))
y_rfPred = pd.DataFrame(data=y_rfPred[:])

# inserting "Random Forest Planned Work"
df['Random Forest Änderungskosten'] = y_rfPred

# indicating which rows are training data and test data
df['Classification'] = y_rfPred
df['Classification'].iloc[X_train.index] = 'training data'
df['Classification'].iloc[X_test.index] = 'test data'
return df, rf_cv_rmse, rf_score, result_gcv, best_model_rf_cv_rmse, best_model_rf_score, rf_model, best_params

df = pd.read_excel(path_aenderungsdB)
with warnings.catch_warnings():
    warnings.simplefilter('ignore')
df_pred, rf_cv_rmse, rf_score, result_gcv, best_model_rf_cv_rmse, best_model_rf_score, \
    best_model, best_params = prediction(df)
result_gcv.update({'RF-Score': best_model_rf_score})
result_gcv_df = pd.DataFrame.from_dict(result_gcv)
# print('CV Grid Search: ' + str(result_gcv) + '\n')
print('Default Parameters' + str(param_default))
print('Root Mean Square Error: ' + str(rf_cv_rmse))
print('RF Score: ' + str(rf_score) + '\n')
print('-----Results with after Parameter Tuning -----')
print('Best Parameters' + str(best_params))
print('Root Mean Square Error: ' + str(best_model_rf_cv_rmse))

```

```
print('RF Score: ' + str(best_model_rf_score) + '\n')
result_gcv_df.to_excel(path_result_gridsearch)
# Save trained model
joblib.dump(best_model, path_trained_model)
```

A.6 Algorithmus zur Prädiktion der Änderungsaufwände

```
import os.path

import pandas as pd
import joblib
import openpyxl
from grundtypen import set_gt

# magic numbers
prediction_value = ['Gesamtaenderungsaufwand']
prediction_Features = [
    'Aenderungstyp',
    'Aenderungsvolumen',
    'Betroffene Objektspezifikation',
    'Grund der Aenderung',
    'Architektur',
    'Ursache der Aenderung',
    'Risiko der Fortpflanzung',
    'Betroffene Stakeholder',
    'Phase des Lebenszykluses',
    'Betroffene Marktausdehnung',
    'Umfang der Aenderung']
# Input File Path
path_trained_model = '../model/trained_rf_model.pkl'
path_to_save_new_prediction = "../data/prediction_for_new_data.xlsx"

# Usage of trained model on new dataset

def predict():
    file_path = input("Please insert the new dataset path" + '\n')
    if file_path == "":
        print(
            b'Default selected: C:\Users\an-me\PycharmProjects\pythonDissertation - And\data\excel input files\Validierung_v02.xlsx")
        file_path = "../data/excel input files/Validierung_v02.xlsx"
    sheet_index = input("Please insert the sheet index" + '\n')
    if sheet_index == "":
        print("Second Sheet selected")
        sheet_index = int(1)
    # Setzen der Grundtypen
    set_gt(file_path, sheet_index)
    df = pd.read_excel(io=file_path, sheet_name=sheet_index)

    # Load trained model
    trained_model = joblib.load(path_trained_model)
    # Dataset Preprocessing
    All_Features = df.columns
    Not_Prediction_Features = All_Features.drop(prediction_Features + prediction_value)
```

```

df_prediction = df.drop(Not_Prediction_Features, axis=1)
# Splitting training data and test data
X = df_prediction.drop(prediction_value, axis=1)
X = X.astype('str')
y = df_prediction[prediction_value]
y_rfPred = trained_model.predict(X)
y_rfPred = pd.DataFrame(data=y_rfPred[:])
df[prediction_value[0]] = y_rfPred
print(y_rfPred)
df.to_excel(path_to_save_new_prediction)

# Auf sheet schreiben
wb = openpyxl.load_workbook(file_path)
sheet = wb.worksheets[int(sheet_index)]
for index, value in enumerate(y_rfPred[0]):
    sheet.cell(row=index + 2, column=22, value=value)
wb.save(file_path)
print("Ergebnisse geschrieben in Excel Sheet" + str(sheet))

# df.to_excel(excel_writer=file_path, sheet_name=file.sheet_names[sheet_index])

```

A.7 Algorithmus zur Minimierung des Aufwands durch Bündelung

```

import itertools
import numpy as np
import pandas as pd
from ortools.linear_solver import pywraplp

# magic_numbers
path_aenderungsdB = './data/excel input files/Validierung_v02.xlsx'
prediction_value = ['Gesamtaenderungsaufwand']

def minimize():
    column_name = prediction_value[0]
    n_columns = 11

    # Lesen Sie die Excel-Datei in einen DataFrame
    df = pd.read_excel(io=path_aenderungsdB, sheet_name=1)

    # Zugriff auf die gewünschte Spalte und Umwandlung in ein Numpy-Array
    costs = df[column_name].values

    # Liste mit den zwei möglichen Werten 0 und 1
    values = [0, 1]

    # Erzeugen Sie alle möglichen Kombinationen von 11 Werten mit Wiederholung
    combinations = list(itertools.product(values, repeat=n_columns))

    # Erstellen Sie eine Matrix aus den Kombinationen
    matrix = np.array(combinations)

```

```

# Gesamtaufwand für jede Kombination berechnend
total_costs = np.dot(matrix, costs)

# Matrix und Gesamtaufwand in einen DataFrame umwandeln
df = pd.DataFrame(matrix, columns=[f'Item_{i + 1}' for i in range(n_columns)])
df['Total_Costs'] = total_costs

# Lese Sie das Array mit den Prozentzahlen und fügen Sie es als neue Spalte zum DataFrame hinzu
percentages = minimierung[0]
for i in range(len(df)):
    if df.iloc[i, 0:n_columns].sum() > 1:
        df.loc[i, 'Percentages'] = percentages[i]
    else:
        df.loc[i, 'Percentages'] = 100 # setzen Sie den Wert auf 1, wenn die Bedingung nicht erfüllt ist

# Multiplizieren Sie die Spalten 'Total_Costs' und 'Percentages'
df['Result'] = df['Total_Costs'] * df['Percentages'] / 100

# Schreiben Sie den DataFrame in eine Excel-Datei
df.to_excel('./data/excel input files/Änderungsbündelung.xlsx', index=False)

num_combinations = len(df)
num_changes = n_columns

print(num_changes)
print(num_combinations)

# Create the mip solver with the SCIP backend.
solver = pywraplp.Solver.CreateSolver('SCIP')

# x[i, j] is an array of 0-1 variables, which will be 1
# if worker i is assigned to task j.
x = {}
for i in range(num_combinations):
    x[i] = solver.IntVar(0, 1, "")

for j in range(num_changes):
    solver.Add(sum(x[i] * matrix[i][j] for i in range(num_combinations)) == 1)

objective_terms = []

objective = solver.Objective()
for i in range(num_combinations):
    objective.SetCoefficient(x[i], int(df['Result'][i]))
objective.SetMinimization()

status = solver.Solve()

if status == pywraplp.Solver.OPTIMAL or status == pywraplp.Solver.FEASIBLE:
    print(f'Total cost = {solver.Objective().Value()}n')
    for i in range(num_combinations):
        for j in range(num_changes):
            # Test if x[i,j] is 1 (with tolerance for floating point arithmetic).
            if x[i].solution_value() > 0.5:
                if x[i].solution_value() * matrix[i][j] > 0:

```

```
    result = df['Result'][i]
    print(f'Änderungsbündel {i + 1} beinhaltet Änderungen {j + 1}.' +
          f' Cost: {result}')
else:
    print('No solution found.')
```

